



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**ZAVEDENÍ METODIKY MĚŘENÍ POMOCÍ TECHNOLOGIE
3D SKENOVÁNÍ DO STROJÍRENSKÉ VÝROBY**

INTRODUCTION OF MEASUREMENT METHODOLOGY USING 3D SCANNING TECHNOLOGY INTO
MECHANICAL PRODUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Klein

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Adam Klein**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **Ing. Jan Šrámek, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zavedení metodiky měření pomocí technologie 3D skenování do strojírenské výroby

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zvýšení přesnosti, rychlosti a spolehlivosti měření pomocí technologie 3D skenování. Porovnání stávajících metod měření s technologiemi 3D skenování.

Cíle diplomové práce:

Zhodnocení současného stavu metodiky měření.

Návrh statistické metody pro vyhodnocení přesnosti a rychlosti měření původních zavedených metod s technologiemi 3D skenování.

Návrh a definice nejvhodnější technologie 3D skenování.

Konkrétní praktické návrhy řešení a doporučení.

Popis dalších možností využití technologie 3D skenování ve výrobě.

Vyhodnocení dosažených výsledků.

Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 9001. Systém managementu kvality: Požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 48 s. Třídící znak 010321.

ČSN EN ISO 14253-1. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Zkouška obrobků a měřidel měřením: Část 1: Pravidla rozhodování pro prokázání shody nebo neshody se specifikacemi. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 36 s. Třídící znak 014100.

KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV Statistika a pravděpodobnost. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá porovnáním běžně používané metody dotykového měření s metodami 3D skenování pro jejich zavedení do strojírenské výroby. V první části je shrnutý současný stav popisem technologií měření s důrazem na 3D technologie a jejich mnohostranné využití. Druhá část předkládá praktické porovnání tří druhů měřicích zařízení na vybraném komponentu z jízdního kola. Po číselném i grafickém vyhodnocení výsledků měření jsou tyto hodnoty dále statisticky zpracovány a spočítány nejistoty měření. Závěrečná část práce zhodnocuje celý proces a uvádí praktické návrhy, možnosti a doporučení.

ABSTRACT

This thesis focuses on comparison of the commonly used method of tactile measurement with 3D scanning methods for their introduction into engineering production. The first part summarizes the current state with the description of measurement technologies with emphasis on 3D technologies and their versatile use. The second part presents a practical comparison of three types of measuring devices on a selected component of a bicycle. After numerical and graphical evaluation of the measurement results, these values are further statistically processed and the measurement uncertainties are calculated. The final part of the work evaluates the whole process and presents practical suggestions, options and recommendations.

KLÍČOVÁ SLOVA

Metody měření, 3D skenování, nejistota měření, reverzní inženýrství

KEYWORDS

Measurement methods, 3D scanning, measurement uncertainty, reverse engineering

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KLEIN, Adam. *Zavedení metodiky měření pomocí technologie 3D skenování do strojírenské výroby* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124433>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Janu Šrámkovi, PhD. za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Dále děkuji firmě ABBAS, a.s. za poskytnutí praktických nástrojů a informací pro tuto práci. Mé poděkování také patří rodině a nastávající manželce za podporu a trpělivost v průběhu celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Šrámka, PhD. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25.6.2020

.....

Bc. Adam Klein

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE.....	16
3	PRINCIPY A TECHNOLOGIE 3D SKENOVÁNÍ.....	17
3.1	Metody 3D skenování.....	17
3.2	Technologie 3D skenování	19
3.3	Materiály pro zmatnění obtížně skenovatelného povrchu	22
4	PARAMETRY VÝBĚRU VHODNÉ 3D TECHNOLOGIE	24
4.1	Parametry výběru	24
4.2	Výstupní data	25
4.3	Využití naskenovaných dat	26
5	LEGISLATIVA A CERTIFIKACE	28
5.1	Zákon č. 102/2001 Sb. o obecné bezpečnosti výrobků.....	28
5.2	Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky.....	28
5.3	Posuzování shody	28
5.4	VDI/VDE certifikát.....	29
6	MĚŘENÍ, CHYBY, NEJISTOTY	31
6.1	Přesnost měření.....	31
6.2	Chyba měření	31
6.3	Normální rozdělení	32
6.4	Nejistota měření	33
7	POUŽITÁ TECHNOLOGIE	35
7.1	RangeVision PRO.....	35
7.2	ZG AtlaScan	38
7.3	Mechanické dotykového rameno Hexagon Absolute Arm 8312-6	40
8	PROCES SKENOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ.....	42
8.1	Měřený objekt	42
8.2	3D skener RangeVision PRO	43
8.3	3D skener ZG AtlaScan	46
8.4	Mechanické měřicí rameno Hexagon Absolute Arm	48
8.5	Vyhodnocení naměřených dat	49
8.6	Výsledky měření	56
8.7	Časová náročnost procesů.....	59
9	ZHODNOCENÍ	61
9.1	Návrh nejvhodnější technologie	61
9.2	Praktické návrhy a doporučení	61
10	ZÁVĚR.....	63
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	64
11.1	Seznam zdrojů grafů, obrázků a tabulek.....	66
12	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	67
12.1	Seznam obrázků.....	67
12.2	Seznam tabulek	67
12.3	Seznam grafů	68

1 ÚVOD

Technologie 3D skenování je jednou z velmi univerzálních metod rekonstrukce reálných objektů do digitální podoby. Používá se k mnoha účelům, a to ve velkém množství oborů, jakými jsou nejen průmysl, ale i archeologie, lékařství nebo architektura. V oblasti průmyslu jsou pak výsledky z 3D skenování využívány nejčastěji k rozměrové kontrole, reverznímu inženýrství či pro aditivní výrobu.

Při pořizování nové technologie do výroby jsou požadavky na nové zařízení velmi rozsáhlé. Může splnit všechny požadavky jedno zařízení? Bohužel, stejně jako je tomu u jiných zařízení, v mnoha situacích není možné splnit tyto požadavky úplně všechny a je nutné udělat u rozhodování často kompromis, který souvisí nejen s technickou stránkou, ale také ekonomickou. 3D skener je však zařízení, které lze využít hned na několika pracovištích výrobního závodu, čímž se stává následně v mnoha situacích nejen technicky, ale i ekonomicky efektivním. V dnešní době digitalizace a automatizace výroby jsou společně i 3D skenery nadále vyvíjeny s potenciálem toho, aby splnily i ten nejširší okruh požadavků pro využití.

Hlavním cílem této diplomové práce je porovnání technologií 3D skenování a dotykového měření, přičemž dotykové měření je dnešním standardem oddělení kontroly kvality ve výrobě a 3D skenery jsou technologie nově zaváděné, ať už v návaznosti na požadavky zákazníků nebo právě pro jejich všestranné využití i v jiných segmentech firmy.

2 MOTIVACE

Z pohledu své aktuální pracovní pozice obchodního zástupce pro 3D skenery je mojí hlavní náplní nalézt nejvhodnější 3D technologii v součinnosti ke stávající situaci a požadavkům zákazníka. Argumentace a pochopení zákaznických potřeb je jednou z nejdůležitějších částí obchodního jednání, při které je nutné disponovat co největším množstvím informací nejen o samotných 3D skenerech. Mezi tyto informace patří jak znalosti o technických parametrech běžně používaných metrologických či jiných zařízení, tak i možnosti technologií a podmínek výroby nebo například materiálech.

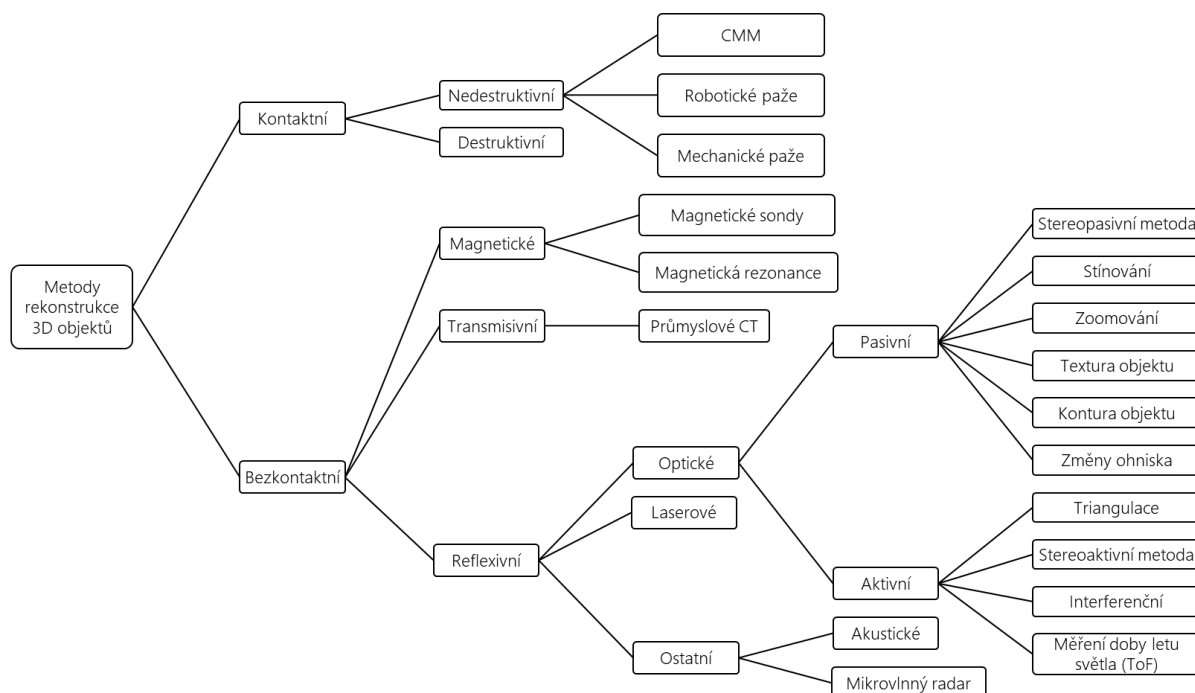
Motivací pro tuto práci pro mne byla možnost přímého porovnání běžně používané dotykové technologie měření ve strojírenské výrobě s technologií 3D skenování. K měření byla také vybrána součástka, která vhodným způsobem odkrývá klady i zápory obou typů technologií, což mi přináší další cenné informace pro diskuzi s potenciálním zákazníkem při obchodním jednání ohledně zavedení technologie 3D skenování. Dále tato práce přináší relevantní výsledky z hlediska nejistoty při opakovaném měření u každého zařízení, které mohou být poskytnuty jak potenciálnímu zákazníkovi, tak i například výrobcí dané technologie, který je schopen tyto informace využít v procesu zlepšování nebo při certifikaci.

3 PRINCIPY A TECHNOLOGIE 3D SKENOVÁNÍ

Technologie 3D skenování se dělí na mnoho druhů metod rekonstrukce dat, přičemž základní dělení je na kontaktní a bezkontaktní. Každá z nich je vhodná k jinému využití a často se dokáží i vhodně doplňovat.

Práce je zaměřena na zavedení bezkontaktní technologie 3D skenování do strojírenské výroby, a proto je tomu přizpůsobeno i základní rozdělení a popis metod, které jsou v praktické části práce porovnávány, tedy optické, laserové a dotykové.

3.1 Metody 3D skenování



Obrázek 1: Rozdělení technologie 3D skenování [5]

3.1.1 Optické metody

Pasivní

U pasivních metod snímání obrazu není do systému zařazen zdroj světla. Odraz je systémem tedy pouze přijímán a nikoli vyslán. Základem je pořízení minimálně dvou snímků z odlišného úhlu snímání, a to buď natočením objektu nebo změnou pozice kamery.

Z výše uvedených pasivních metod patří mezi nejvyužívanější stereopasivní metoda. Ta je založena na principu stereoskopie, kde probíhá zpracování obrazu ze dvou kamer. Dochází k vytvoření 2D obrazu obou kamer a výsledkem je geometrie povrchu, která je vypočítána ze vzájemné orientace obou kamer a z rozdílných pozic nasnímaných bodů. [15], [20]

Aktivní

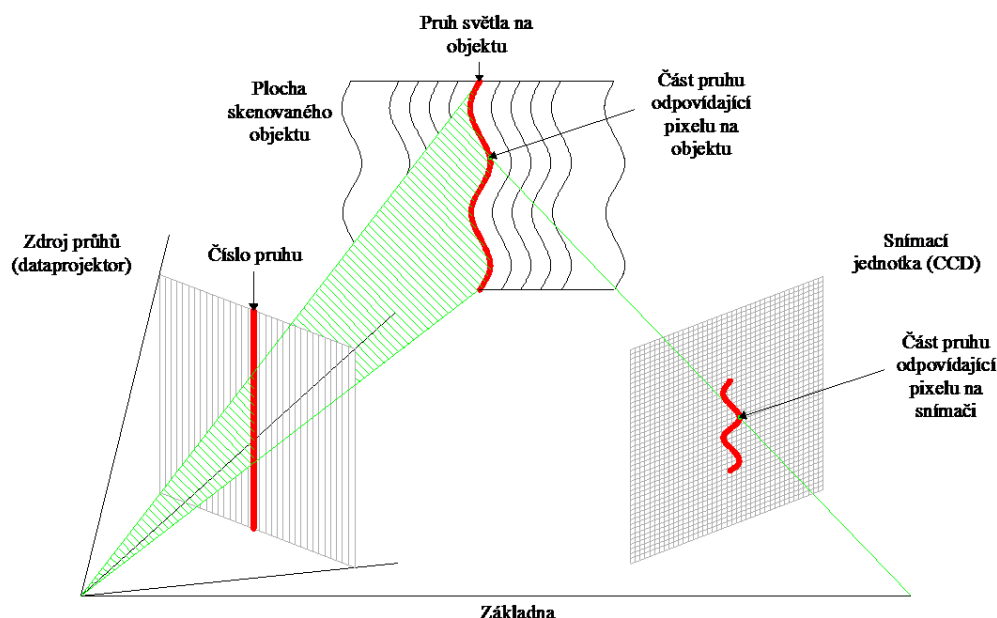
Aktivní metody, obdobně jako pasivní, řeší snímání odrazu světla, s tím rozdílem, že tady je využití zdroje světla. Světlo může emitovat energii na povrch objektu hned v několika formách. Ze všech níže uvedených metod nás vzhledem k zaměření práce budou nejvíce zajímat metody triangulační. [22]

Triangulace

- Světelný paprsek (1D)
- Světelný pruh (2D)

Obě metody jsou využívány především u laserového skenování, viz kapitola Laserové metody.

- Strukturované světlo (3D)



Obrázek 2: Princip metody strukturovaného světla [43]

U optického skenování je to jedna z nejvyužívanějších metod snímání. Jedná se o rychlou metodu záznamu, která je ovšem limitována typem povrchu objektu. U lesklých, transparentních či některých černých povrchů velmi narůstá chybovost této metody, z důvodu nežádoucího odrazu paprsků světla. V těchto případech je nutné povrch opatřit matným nástríkem, aby se zajistila správná odrazivost světla. Celý proces digitalizace probíhá nejprve projekcí určitého definovaného vzoru na objekt. Jedna nebo více kamer snímá vzor, který je geometrickým povrchem zdeformován a dle určeného algoritmu vytvoří prostorově orientované body neboli tzv. mračno bodů. Tyto body lze pomocí dalších procesů převést na souvislý povrch. [12], [14]

3.1.2 Laserové metody

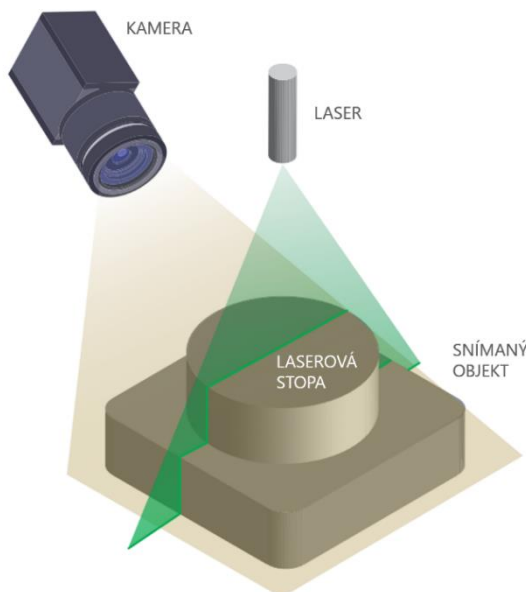
Princip laserového 3D skenování je projekce laserového paprsku. Paprsek je vysílán na povrch skenovaného objektu a pomocí speciálních kamer, tzv. CCD/CMOS snímačů je snímán jeho odraz. Doba odrazu je určena například pomocí fázového posunu. Jako metoda vyhodnocení se využívá TOF (time of flight) nebo laserová triangulace. [25]

Doba letu paprsku (TOF)

Tato metoda vyhodnocuje čas, kdy je paprsek vyslán na objekt a přijatý zpět. Z tohoto naměřeného času je poté vypočítána vzdálenost mezi vysílačem a povrchem objektu. TOF je metoda vhodná pro skenování středních a větších vzdáleností i objektů. [25], [26]

Laserová triangulace

Triangulační skener vytvoří pomocí laserového zařízení bodovou či čárovou stopu a CCD kamera z druhé strany základny 3D skeneru snímá odraz, obdobně jako u principu strukturovaného světla. Geometrie povrchu je tak vypočítána metodou trojúhelníku. Laserová triangulace je vhodnější pro skenování z menších vzdáleností a tedy pro menší objekty. [23]



Obrázek 3: Metoda laserové triangulace [44]

3.2 Technologie 3D skenování

3.2.1 Fotogrammetrické systémy

Fotogrammetrie je složena ze slov photos (světlo) a gramma (záznam). Je to proces, který se zabývá měřením a vyhodnocením světelných záznamů. Fotogrammetrické systémy lze zařadit do metod pasivní optické technologie. Základní princip je založen na získání 2D fotografií, ze kterých jsou vytvořena 3D data. Z pořízených snímků jsou získány informace o jednotlivých bodech v podobě polohy a tím je možné určení tvaru objektu, velikosti a umístění.

K rekonstrukci 3D objektů je nutné pořídit více snímků, ze kterých je poté možné získat mračno bodů. To lze získat pomocí průsekové fotogrammetrie (2 a více překrývajících se snímků) nebo stereogrammetrie (2 snímky při rovnoběžných osách záběru). Existuje také jednosnímková fotogrammetrie, ale tato metoda je relativně málo přesná.

Systémy tohoto typu jsou využívány pro menší i velké objekty, například v oblasti filmu, designu, geodézie apod. Velkou část práce v této oblasti zajišťuje kvalitní software, který je schopný převést 2D fotografie do mračna bodů během krátké chvíle. [11]

3.2.2 Optické 3D skenery

Stacionární a mobilní skenery

Stacionárním skenerem je zařízení, které při skenování (respektive daném snímku) nevykonává pohyb a je upevněno ve stativu, robotickém rameni, či jiném zařízení. Tyto skenery mohou snímat objekt jak monoskopicky (projektor + 1 kamera), tak i stereoskopicky (projektor + 2 kamery). Často lze také měnit velikost skenovacího pole posunem kamer (změnou báze). Data jsou sbírána po jednotlivých snímcích z několika pozic a úhlů, poté jsou následně skládány a registrovány, aby vytvořily kompletní 3D model.



Obrázek 4: Stacionární optický 3D skener [32]

Výhodou těchto skenerů je zpravidla vysoká přesnost a rozlišení, naopak nevýhodou je nižší flexibilita z hlediska přenášení a oproti ručním skenerům i nižší rychlost snímání dat.

Ruční optická zařízení vynikají především skvělou flexibilitou, přenosností a rychlostí, s jakou jsou schopny dosáhnout výsledku. Tyto vlivy však mohou mít dopad na celkovou přesnost skenu. Skenery zvládnou snímat objekt až desítkami snímků za sekundu. Tyto snímky jsou registrovány v reálném čase a na základě buď pouze geometrie objektu nebo jsou schopny k registraci využít i barvu a texturu. Pohybem skeneru v různých pozicích a úhlech je 3D model vytvořen ve velmi krátkém čase.

Pro eliminaci chyb registrací snímků je možné využít také referenčních značek umístěných na objekt nebo v okolí objektu, které zajistí přesné skládání snímků a registraci nasbíraných mračen bodů.

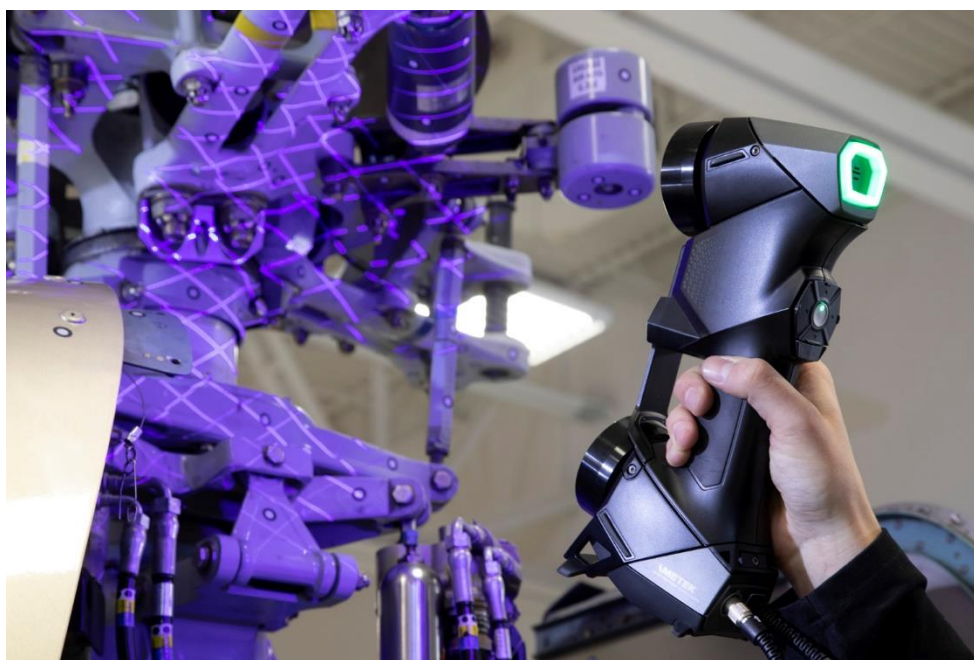
3.2.3 Laserové 3D skenery

Stacionární laserové skenery lze rozdělit do dvou hlavních skupin.

První skupinou jsou dálkové skenery, které jsou vhodné pro snímání velkých objektů. Těmi mohou být budovy, místnosti, automobily či velká strojní zařízení. Tyto skenery využívají metodu doby letu paprsku (ToF)

Druhou skupinou jsou 3D skenery pro detailní a přesné skenování, zejména menších a středních objektů. Tato zařízení se využívají ve strojírenských oblastech pro měření a mohou být, jako v případě optických skenerů, stacionární či mobilní. Metoda pro digitální rekonstrukci těmito 3D skenery je pak zpravidla laserová triangulace. Skenery tohoto typu dále využívají referenční značky pro získání informace o souřadnicích.

Samostatnou kapitolou mohou být mobilní laserové 3D skenery, které skrývají mnoho druhů nastavení. V dnešní době jsou na trhu zařízení, které mohou měnit i druh laseru či počet laserových křížů. Tyto nastavení pak způsobují změnu rychlosti snímání, velikost snímané plochy nebo rozdílné rozlišení. Jeden pruh laseru v kombinaci se snímáním jednou kamerou je pak vhodný například pro skenování děr.

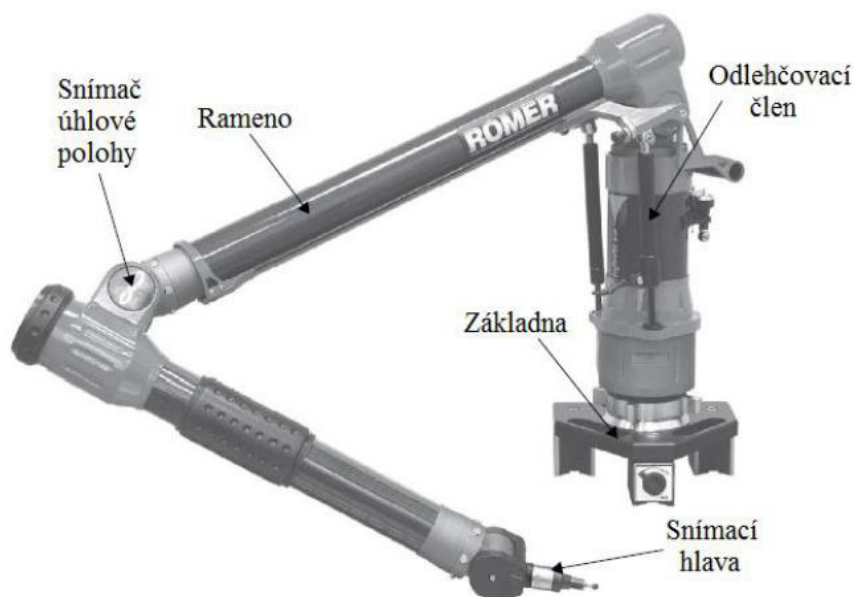


Obrázek 5: Mobilní laserový 3D skener [30]

3.2.4 Dotyková nedestruktivní 3D technologie

Při kontaktu přístroje s povrchem snímaného objektu není tento povrch nijak poškozen. Princip technologie spočívá v dotyku hrotu měřicího přístroje s povrchem objektu v určeném místě a přenesení 3D souřadnic do CAD softwaru. Výhodou těchto přístrojů je možnost skenování

velmi složitých povrchů či děr a také časová efektivita. Nevýhoda tkví především v tom, že nesnímají celý povrch objektu, ale měří pouze určená místa. [19]



Obrázek 6: Dotykové měřicí rameno [38]

- mechanická ramena
- souřadnicové měřicí stroje (CMM)
- robotická ramena

3.2.5 Ostatní 3D skenery

Destruktivní

Skenování probíhá v kombinaci s optickým skenerem tak, že odfrézováním tenkých vrstev materiálu je každý nový povrch pod odfrézovanou vrstvou snímán opticky. 3D model je tak složen z jednotlivých snímků a obsahuje i informace z vnitřních částí objektu. [19]

Ultrazvukové

Pomocí ultrazvukové sondy je vysílán zvukový signál, který je převeden do prostorových souřadnic. Využívá se především pro kontrolu kvality. [19]

Průmyslové CT

Je zařazeno do kategorie transmisivních skenerů. Touto technologií je možná získat údaje o vnitřních částech objektu. Oproti zdravotnictví se u průmyslových zařízení využívá vyšší intenzita záření. [19]

3.3 Materiály pro zmatnění obtížně skenovatelného povrchu

Optické skenování nese svoje limita a ty se často týkají především typu skenovaného objektu. Nejhorší skenovatelnými jsou lesklé, černé či průhledné povrchy a pro zajištění kvality 3D

skenů je třeba opatřit povrch objektu matnícím nástřikem. K zajištění kvalitního výsledku je nutné, aby byl nástřik pokud možno homogenní a zároveň i v dostatečné vrstvě.

Křídový prášek

Nejčastěji ve formě spreje je křídový prášek zařazen mezi nejvyužívanější materiály pro zmatnění povrchu při optickém 3D skenování. Jeho hlavní složkou je uhličitán vápenatý (CaCO_3). Velkou výhodou je cena a mezi nevýhody patří větší tloušťka nanesené vrstvy, díky které mohou zaniknout některé detaily na skenovaném objektu. [3], [29]

Oxid titaničitý (TiO_2)

Před nanesením tohoto prášku na objekt je třeba nejprve připravit roztok a poté vybrat vhodnou technologii k nanesení – mezi ty nejvíce vhodné patří airbrush pistole. V porovnání s křídovým práškem je na objekt nanesena mnohem tenčí vrstva a tím je zaručeno uchování i těch největších detailů pro skenování. Mezi nevýhody patří cena a také pracná příprava roztoku a další náklady na nákup airbrush pistole pro nanesení prášku. [10]

Vypařovací prášky

Matnící materiály, které se dokážou samovolně vypařovat jsou vhodné pro skenování takových objektů, do kterých není možné mechanicky zasáhnout při čištění. Doba vypařování je vždy závislá na okolní teplotě, tloušťce nanesené vrstvy a případně i proudění vzduchu. Dříve byl používán prášek, který se dokázal vypařit a tím je cyklododekan ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}$). Je to sloučenina ze skupiny nasycených alkalických uhlovodíků. Nevýhodou tohoto materiálu byl značný zápach při vypařování, protože je používán nejčastěji v kombinaci s rozpouštědlem. Dnešní doba již přinesla materiály, které nevydávají nepříjemný zápach při vypařování a zároveň dokáží vytvořit tenkou souvislou vrstvu ke zmatnění i objektů s vysokým detailem.

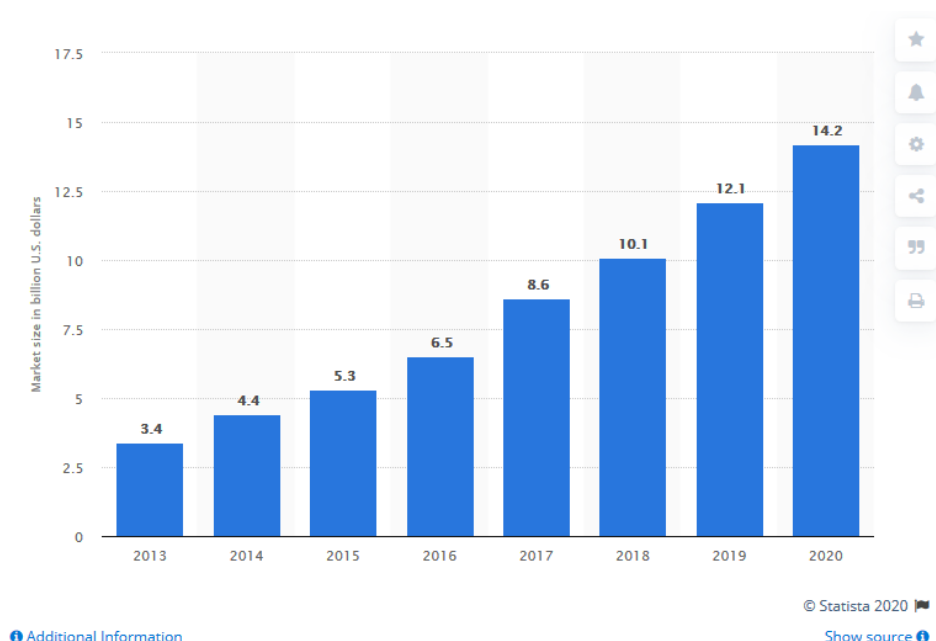
4 PARAMETRY VÝBĚRU VHODNÉ 3D TECHNOLOGIE

Každý obor má svá specifika a požadavky, a proto výběr konkrétní vhodné technologie není mnohdy jednoduchý.

Nejprve je třeba si při výběru 3D skeneru uvědomit, že neexistuje nejuniverzálnější zařízení, které by dokázalo splnit požadavky každému uživateli. Proto je třeba zvážit při výběru, jaké nejdůležitější požadavky převládají a u ostatních vytvořit kompromis.

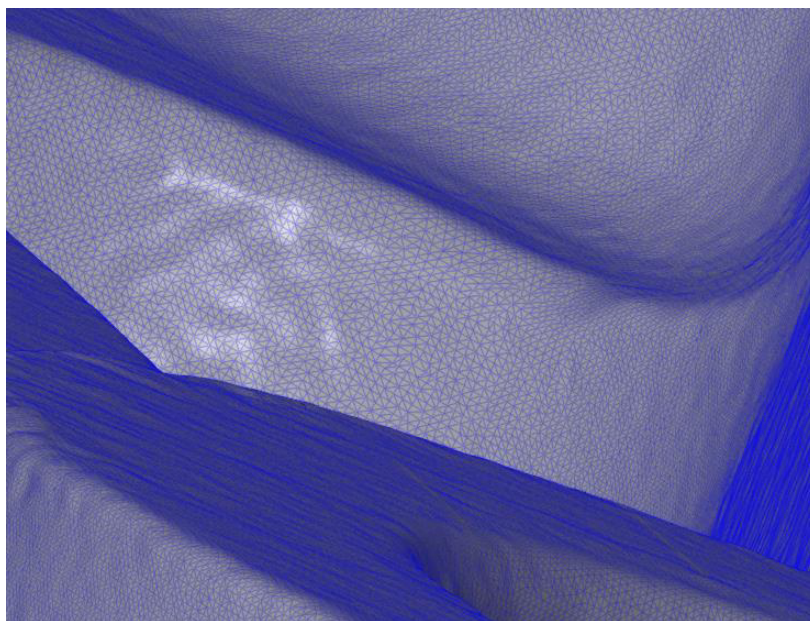
4.1 Parametry výběru

- 1) dle objektů
 - nutná specifikace objektů, které budou skenovány, případně měřeny
- 2) dle požadavků na přesnost
 - zvážit, jaká přesnost a rozlišení bude vyhovující pro většinu objektů
- 3) dle flexibility zařízení
 - specifikace místa využití, odbornosti obsluhy, rychlosti vyhodnocení apod.
- 4) cena
 - „Cena až na prvním místě.“ je věta známá snad v každé obchodní oblasti. Všechny výše uvedené parametry výběru jsou ať přímo či nepřímo spojeny s cenou. Samozřejmostí je, že s cenou roste ve většině případů i kvalita, ale nemusí to tak být v případě ostatních parametrů skeneru a jejich ovládacích softwarů. Proto je třeba zvážit kombinaci všech výše uvedených parametrů společně.



Graf 1: Globální vývoj trhu u 3D skenerů [35]

4.2 Výstupní data



Obrázek 7: Polygonová síť - detail [vlastní]

Data z 3D skenerů nemusí nést informaci pouze geometrickou, ale mohou být doplněny i o reálnou barvu a texturu povrchu. Možností exportu dat je hned několik a záleží na dalším využití, jaký formát je v danou situaci nejvhodnější.

4.2.1 Nejpoužívanější výstupní formáty

.STL

Data jsou tvořena polygonovou sítí, která tvoří povrch naskenovaného objektu. Jedná se o nejčastější výstupní formát podporovaný většinou 3D skenerů. Tento jednoduchý způsob vykreslení tvaru je možné využít vstupní data pro 3D tiskárnu, ale i pro potřeby měření. Pro editaci dat je nutný specializovaný software, protože CAD systémy mohou načíst model pouze jako grafiku. [1]

.OBJ

Tento formát nese informaci stejného druhu jako STL, tedy v podobě polygonové sítě. Rozdílem je, že navíc obsahují data i barvu a texturu povrchu objektu. Snímky, které nesou barevnou informaci jsou pořízeny spolu s procesem skenování. [1]

.PLY

Obdobně jako OBJ, i PLY nese záznam barvy a textury objektu. Jedná se o velmi flexibilní a přehledný formát, který popisuje objekt pomocí vrcholů a ploch. [4]

Mračno bodů (.dxf, .ptx, .asc, .wrl)

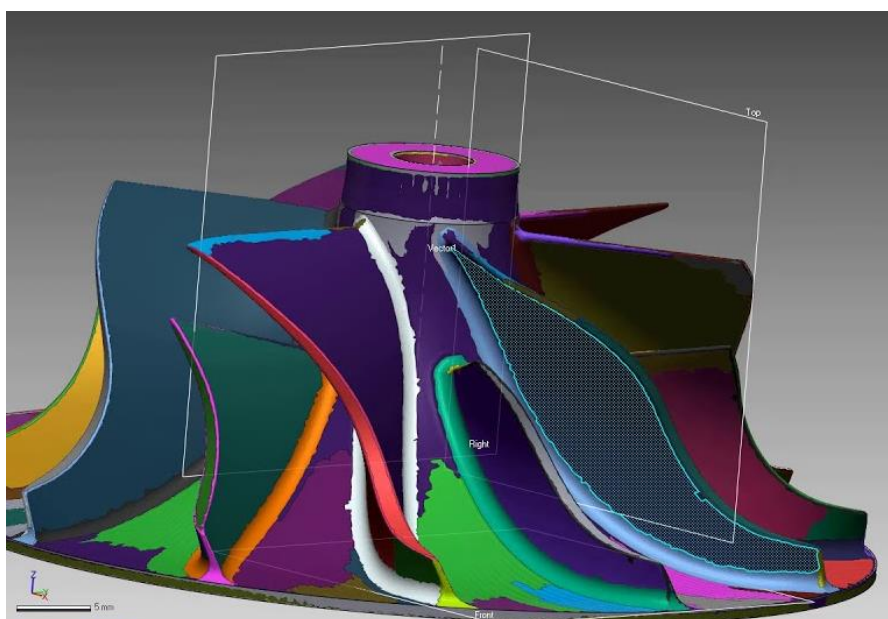
Povrch je vykreslen jednotlivými prostorovými body, kdy každý má svoje souřadnice v osách x, y, z. Tyto body nejsou nijak spojeny a z hlediska grafických prací je proto práce s nimi složitější než v předchozích případech. Absence plošného zobrazení může u menších a geometricky složitějších objektů vypadat nejednoznačně, proto se tento typ výstupních formátů využívá především u dálkového skenování větších objektů. [1]

4.3 Využití naskenovaných dat

4.3.1 Reverzní inženýrství

S tímto pojmem se setkáváme v různých průmyslových oblastech čím dál častěji i vzhledem k celkové digitalizaci výroby.

Je to proces, kdy dochází ke zjištění technologických parametrů objektu. Ve světě 3D skenování je pojem reverzní inženýrství spojen s převáděním nasnímaných 3D dat reálného objektu na CAD model. Ten pak slouží pro výrobu nového dílu, analýzu či k designovým úpravám.



Obrázek 8: Detekce ploch pro reverzní inženýrství [34]

K tomuto převedení dat jsou třeba specializované softwary. Mezi jejich možnosti mohou běžně patřit i funkce automaticky generovaných ploch. V takovém případě musí být však pro tuto automatickou funkci nasnímaná data kompletní. Jako nevýhodu této funkce můžeme označit omezenou editaci ploch, ale obrovskou výhodou je v tomto případě časová úspora.

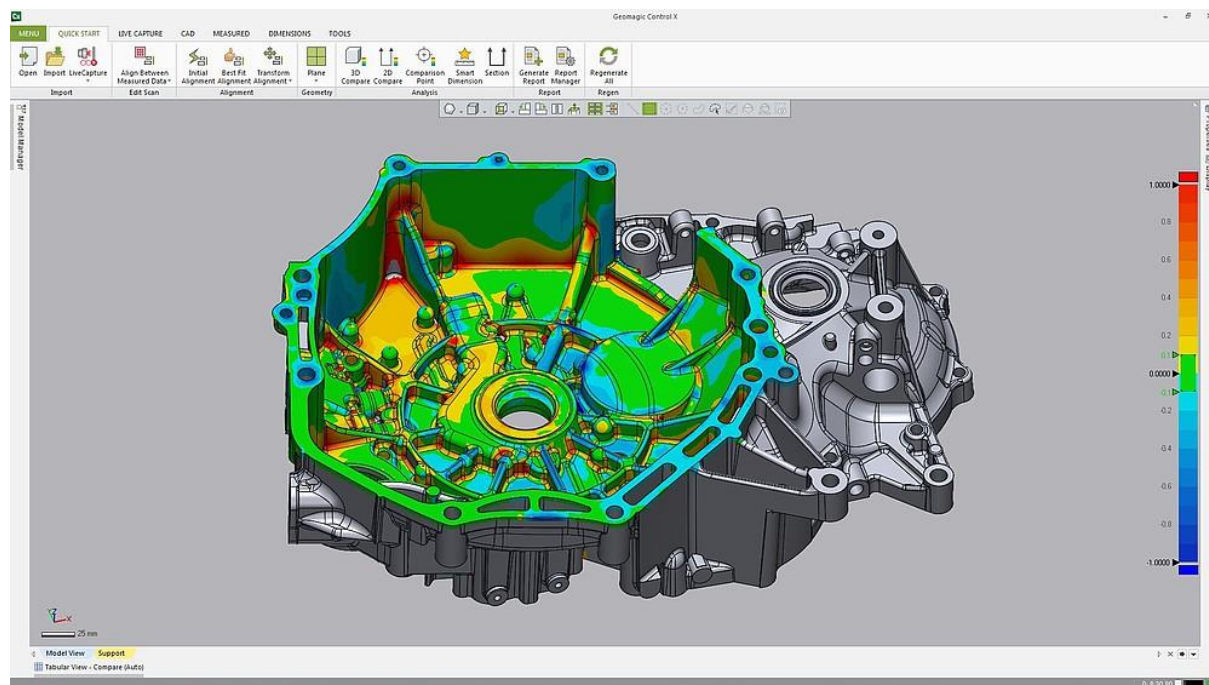
Ruční modelování je o poznání pomalejším procesem, ale všechna data má uživatel pod kontrolou a všechny plochy jsou poté i plně editovatelné. Naskenovaná data tu představují vzor, podle kterého je pomocí klasických konstrukčních metod konstruován CAD model. Časová náročnost představuje i vyšší náklady, ale výsledek je v mnoha případech použitelnější než v případě automaticky generovaného modelu.

Dnešní doba ale přináší již mnoho doplňků pro práci s naskenovanými daty jak do konstrukčních programů, tak i například do obslužných softwarů 3D skenerů. Díky těmto aspektům vzniká uživateli větší pohodlí při práci v prostředí, které zná a firma tím nemusí zvyšovat náklady na pořizování nových specializovaných softwarů. [1]

4.3.2 Rozměrová kontrola

Nasnímaná 3D data lze měřit několika způsoby. Mezi nejčastější se řadí porovnání 3D skenu s CAD modelem. Tento způsob probíhá v překrytí obou modelů a vykreslení barevné mapy

odchylek. Samotnému vyhodnocení předchází celkové ustavení do správné pozice. Ustavovacích metod je velké množství, jako je celkový bestfit (nejmenší odchylka pro celý model), lokální bestfit (nejmenší odchylka ve zvolené oblasti modelu) nebo například RPS body, které se využívají především v automobilovém průmyslu.



Obrázek 9: Rozměrové porovnání CAD modelu a 3D skenu [42]

Další způsob měření je vytvoření lokálních ploch proložených do naskenovaných dat, od kterých jsou poté získávány hodnoty. V některých případech může postačit i měření samotné naskenované plochy, ale tento způsob je nejméně přesný a je tudíž využíván zpravidla pouze pro orientační kontrolu základních rozměrů.

4.3.3 Aditivní výroba

Zdrojový formát STL, který 3D tiskárna využívá může být výstupním formátem 3D skenerů a v tom případě se tedy nabízí přímá kombinace využitelnosti obou technologií.

4.3.4 Další využití

Archivace 3D dat, vizualizace a design, počítačové hry, aplikace a konfiguratory

4.3.5 Oblasti pro využití 3D skenerů

Průmysl, architektura, průmysl, architektura, archeologie, památková péče, lékařství, umění a design, film, počítačové hry, kriminalistika a další.

5 LEGISLATIVA A CERTIFIKACE

K prodeji či distribuci 3D skenerů v EU je třeba splňovat legislativní požadavky. Tato legislativa především požadavky bezpečnostní, technické, ale je tu také zahrnuto posuzování shody stanovených výrobků při jejich dodávání na trh.

5.1 Zákon č. 102/2001 Sb. o obecné bezpečnosti výrobků

Výklad zákona pojednává, že v souladu s evropským právem, jsou výrobky uváděné na trh bezpečné jak z hlediska bezpečnosti, tak i ochrany zdraví.

Výrobkem se v rámci tohoto zákona rozumí jakákoli movitá věc, bez ohledu na stupeň jejího zpracování, která je určena pro spotřebitele.

Bezpečným výrobkem je ten, který za běžných či předvídatelných podmínek použití nepředstavuje po výrobcem určenou dobu nebezpečí pro spotřebitele. [6]

5.2 Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky

Představuje pro spotřebitele nutný doplněk veřejnoprávní ochrany. Upravuje způsoby stanovení technických požadavků na výrobky, práva a povinnosti osob, které uvádějí na trh, distribuují nebo uvádějí do provozu výrobky. Dále například upravuje i podmínky tvorby a uplatňování technických norem.

Do technických požadavků na výrobek je zahrnuta především technická specifikace. Ta stanovuje požadované charakteristiky výrobku, zkoušení či postupy pro posuzování shody výrobku s právními předpisy či technickými normami. Další otázky, na které odpovídá tento zákon jsou z oblasti životního cyklu výrobku, a to například jeho recyklace, podmínky opětovného použití nebo i likvidace. [7]

5.3 Posuzování shody

Cílem je u stanovených výrobků posoudit shodu s technickými požadavky stanovenými nařízeními vlády. Dokument Prohlášení o shodě může vydat i výrobce či distributor daného výrobku a přitom nese za toto prohlášení plnou zodpovědnost.

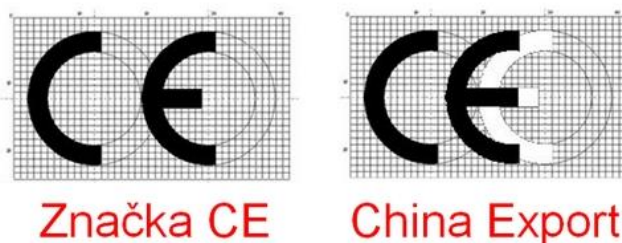
Prohlášení o shodě pro 3D skenery je vztaženo k určitým kategoriím stanovených výrobků:

- Elektrická zařízení nízkého napětí
- Rádiová a telekomunikační koncová zařízení (v případě, že 3D skener má například vlastní wifi vysílač/přijímač)
- Elektromagnetická kompatibilita

Do prohlášení o shodě 3D skeneru je zpravidla zahrnuta i směrnice o omezení nebezpečných látek.

Posuzování shody provádí notifikovaná právnická osoba a soubor činností vykonaných pověřenými osobami, které se uskuteční s cílem zabezpečit posouzení shody se nazývá Státní zkušebnictví. [27]

5.3.1 Označení CE



Obrázek 10: Rozdíl mezi označením CE a China Export [39]

Označení CE slouží pro odkaz, že daný výrobek byl přezkoušen a je ve shodě s legislativou Evropského společenství.

Postup k označení CE

- Zjištění směrnic a harmonizovaných norem, které se na výrobek vztahují
- Ověření požadavků specifikovaných pro produkt
- Ověření nutnosti nezávislého hodnocení shody notifikovaným orgánem
- Testy výrobku k ověření jeho shody
- Vypracování požadované technické dokumentace a zajištění její dostupnosti
- Upevnění označení CE na produkt

Právě samotné upevnění označení CE na výrobku je důležitým faktorem, který je při nesplnění ohodnocen velmi vysokými sankcemi až 50 milionů Kč. Pouhé prohlášení o shodě v tomto případě nestačí. Připevnění probíhá před uvedením produktu na trh a označení připevňuje výrobce, nicméně distributor či dovozce je zodpovědný za bezpečnost výrobku, ale i za přítomnost označení CE. [27], [17]

5.3.2 Označení CCZ

Jedná se o českou variantu CE označení nebo také českou značku shody. Značka prokazuje splnění požadavků nařízených vládou České republiky a prokazuje shodu v oblastech, kde není uplatněna legislativa EU. Použití značky je na trhu pouze v omezené míře a nejčastěji v oblasti stavebnictví. Společné označení CE a CCZ není přípustné. [17]

5.4 VDI/VDE certifikát

V oblasti optického 3D skenování existuje k ověření charakteristik přesnosti nejdůležitější směrnice VDI/VDE 2634-2. Ta využívá postup, kde se použijí předem přesně určené objekty jako reference. Ve směrnici jsou předepsány rozměry těchto objektů, ale i postupy k určení odchylek. Měření porovnáváním s referencí není vázané jen na směrnici VDI/VDE 2634-2, ale pro odvození chyb měření je možné použít i relevantní vlastní postupy a referenční objekty. [28]

5.4.1 Postup testování

Samotné testy jsou rozděleny na dvě části. První je zaměřena na měření referenčních koulí, jakožto ověření parametru přesnosti. Druhá na měření referenční roviny, která ukazuje preciznost měření. [28]

Sphere - spacing error

- skenování referenčního objektu (ball-bar), minimálně ze sedmi pozic
- výpočet rozdílů délky mezi středy koulí $\Delta L = L_m - L_k$
- výsledný parametr SD je definován jako největší absolutní odchylka ΔL , které bylo dosaženo
- pokud je parametr SD známý a test slouží pro ověření udávané přesnosti zařízení, pak všechny absolutní hodnoty ΔL musí být nižší než udávaný parametr
- v případě, že je v jednom případě odchylka překročena, může být měření jednou opakováno [28]

Flatness error

- skenování rovinného referenčního objektu, minimálně v šesti pozicích
- výsledný parametr R_e se získá součtem absolutních hodnot největších odchylek
- pokud je parametr R_e známý, a test slouží pro ověření udávané přesnosti zařízení, pak všechny absolutní hodnoty odchylek musí být menší než udávaný parametr
- v případě, že je v jednom případě odchylka překročena, může být měření v dané pozici opakováno [28]



Obrázek 11: Artefakty pro testování dle VDI/VDE 2634 [33]

V dnešní době je německá směrnice VDI/VDE 2634 jediná použitelná směrnice k ověření přesnosti optických a laserových 3D skenerů. I přesto, protokol, tedy výstup z testování dle této směrnice, není závazný.

6 MĚŘENÍ, CHYBY, NEJISTOTY

Pojem měření definován v Mezinárodním metrologickém slovníku – VIM (Technická normalizační informace – TNI 01 0115) jako experimentální získávání hodnot veličiny, které mohou být následně přiřazené veličině. V reálném případě jsou do výsledku měření přenášeny chyby, a sice metodou měření, měřidlem či lidským faktorem. Pro správné měření se předpokládá, že budou popsány postupy měření, podmínky, měřené veličiny a další související fakta. [16]

6.1 Přesnost měření

Termín přesnost měření je dle VIM 2.13 definovaný hned dvěma termíny, a to jako správnost a preciznost měření. Obecně přesnost představuje těsnost shody mezi měřenou hodnotou a pravou hodnotou veličiny. [21]

Správnost (pravdivost) měření

Není hodnocena jako veličiny, ale je nepřímo vztažena k systematické chybě. Definována je dle VIM jako těsnost shody mezi aritmetickým průměrem a referenční hodnotou veličiny. [16]

Preciznost (shodnost) měření

Je vyjádřena mírou neshodnosti (směrodatná odchylka, rozptyl, apod.). Vyjadřuje těsnost shody mezi naměřenými hodnotami veličiny, které jsou získány opakovaným měřením za stejných podmínek. [16]

6.2 Chyba měření

Spolu s přesností jsou vázány také chyby měření. Chybou měření je naměřená hodnota veličiny odečtená od hodnoty referenční. Chyby můžeme rozdělit do tří základních skupin.

- Hrubé chyby
- Systematické chyby
- Náhodné chyby [21]

6.2.1 Hrubé chyby

Hrubá chyba je nejčastěji spojena s nesprávností měření. To může být zapříčiněno hned několika okolnostmi, jakými jsou poškozené, nefunkční nebo jinak nevhodné měřidlo. Dále jsou příčiny hrubých chyb spojovány se způsobností či indispozicí obsluhy nebo nevhodnými podmínkami. Všechny příčiny jsou u této chyby způsobeny výjimečně. Tento druh chyb je odhalitelný, odstranitelný a dále se nezahrnuje do hodnocení chyby měření. Pokud by byla hrubá chyba zahrnuta do výsledků měření, může dojít ke zkreslení výsledků, a proto je třeba jejich odstranění ze souboru měření. Dojde-li k odhalení této chyby již v procesu měření, proces je pozastaven a dále pak zjištěna a odstraněna příčina. Pro rozpoznání hrubých chyb

v naměřeném souboru hodnot je možné využití normálního rozdělení hustoty pravděpodobnosti. [21]

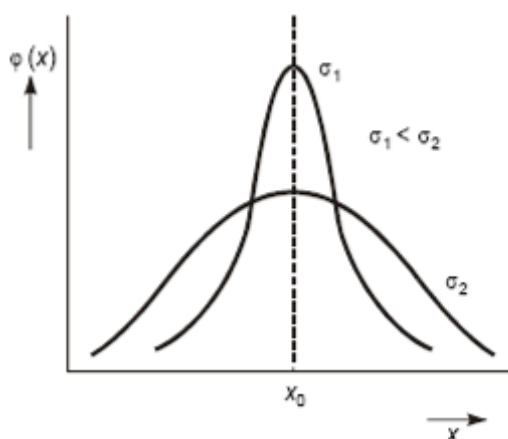
6.2.2 Systematické chyby

V opakujících se měřeních je tato chyba konstantní a nebo se může nepředvídatelně měnit. Chyby tohoto typu zkreslují výsledky měření pravidelně a za stávajících podmínek vždy výsledek zvětšují nebo naopak zmenšují, a to bez ohledu na počet opakování. Jejich projev není často jednoduché odhalit a v některých případech to je možné až v porovnání s výsledky jiného měřidla. Vznik systematické chyby je možný také z časového hlediska, kde působí stárnutí či opotřebování měřícího přístroje. Pro vyloučení těchto chyb musíme provést korekci přístroje nebo výměnu za přesnější. Samotný odhad chyby je především závislý na daných podmínkách při měření, ale také na praktických zkušenostech samotného pozorovatele. [21]

6.2.3 Náhodné chyby

Tyto chyby vznikají při působení velkého počtu náhodných vlivů, které nejsou předvídatelné a jsou popsány určitým pravděpodobnostním rozdělením. Na rozdíl od hrubých a systematických chyb, které lze určitými způsoby odstranit, je výskyt náhodných chyb zákonitý u každého měření a nelze je žádným způsobem ovlivnit. Pokud jsou určité vlivy kontrolovány, příčiny vzniku náhodných chyb se mění náhodně a zcela nekontrolovaně. Při opakovaném měření kolísají náhodně a to jak velikostně, tak i ve znaménku. Ve velkém počtu opakování měření lze pomocí matematických pravděpodobnostních zákonů odhadnout vliv náhodných chyb na přesnost měření. [21]

6.3 Normální rozdělení



Graf 2: Gaussovo rozdělení [21]

V případě, že četnost naměřené hodnoty a její závislost na hodnotě veličiny, je zanesena do grafu, zjistíme, že křivka grafu bude dokonale hladká a symetrická, a sice v případě velkého počtu měření $n \rightarrow \infty$. Toto rozdělení, též zvané jako Gaussovo, vychází z předpokladu, že:

- a) výsledná chyba je výsledkem velkého počtu malých a navzájem nezávislých chyb měření
- b) odchylky (kladné i záporné) od skutečné hodnoty jsou mají stejnou pravděpodobnost

Tvar funkce normálního rozdělení:

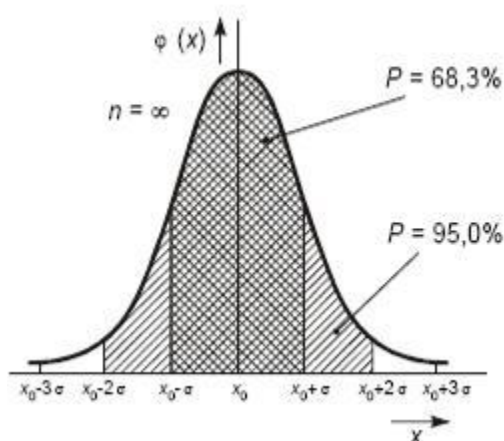
$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

σ^2 - rozptyl

σ - směrodatná odchylka

x - hodnota měření z nekonečné řady

$\varphi(x)$ - hustota pravděpodobnosti hodnot veličiny x [18]



Graf 3: Intervaly pravděpodobnosti [21]

6.4 Nejistota měření

Nejistota je nezáporný parametr, který charakterizuje rozptýlení hodnot přiřazených k měřené veličině, je složena z několika částí a lze rozdělit do dvou základních skupin.

Typ A - u tohoto typu nejistoty je hodnota vyčíslena pomocí statistické analýzy

Standardní nejistota typu A je vypočítána z opakovaných měření a její hodnota s nárůstem měření klesá. Při nezávislých měřeních je vázána na výběrový průměr \bar{x} a zjistí se výpočtem směrodatné odchylky tohoto průměru $s(\bar{x})$ [21]

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

Typ B - vyjadřuje jiný odhad než v případě typu A.

Je nezávislá na počtu měření a zahrnujeme do ní složky stanovené jinak, než statistickým výpočtem hodnot opakovaných měření, jako v případě typu A. Zahrnujeme sem hustotu pravděpodobnosti měřené veličiny a další dostupné informace. [21]

Kombinovaná nejistota - používaná, pokud se výsledek získá z hodnot dalších uvažovaných veličin.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$
$$U = k \cdot u_c$$

Stav, kdy hodnota výsledku, včetně rozšířené nejistoty U obsahuje jednu toleranční mez. [2]

7 POUŽITÁ TECHNOLOGIE

7.1 RangeVision PRO



Obrázek 13: Optický 3D skener RangeVision PRO [vlastní]

Stacionární optické zařízení, založené na principu strukturovaného světla a stereoskopického snímání. Technologie umožňuje snímání bílým i modrým světlem. Při procesu skenování jsou promítány pruhy při fázovém posunu. Díky variabilním skenovacím zónám lze pohodlně skenovat malé objekty od velikosti mince až po větší objekty, kterými mohou být i celé automobily. Full HD projektor a 6Mpx kamery umožňují skenovat s vysokou přesností a rozlišením. Tento 3D skener není certifikován dle směrnice VDI/VDE 2634-2, což se ale pozitivně odráží na příznivé ceně tohoto univerzálního skenovacího zařízení.

7.1.1 Technické parametry

Projektor: Full HD

Světlo: LED – modré, bílé

Kamery: 6 Mpx (možná i základní varianta s 3 Mpx)

Připojení: USB 3.0

Výstupní formáty: .stl, .obj, .ply, .ptx

Tabulka 1: Skenovací zóny [41]

Skenovací zóna	L	M	S
Rozměry zóny (V x Š x D) [mm]	550 x 340 x 360	320 x 210 x 200	140 x 90 x 80
3D bodová přesnost [mm]	0,06	0,03	0,018
3D rozlišení [mm]	0,18	0,10	0,04
Pracovní vzdálenost [mm]	900	520	350

7.1.2 Podmínky pro skenování

Skenování se stacionárními skenery je náročnější na podmínky než v případě mobilních 3D skenerů. Tím, že snímek je pořízen v určitém čase, musí být podmínky v tomto čase stabilní, aby nenarušily kvalitu skenu.

- seřízení 3D skeneru na vybranou skenovací zónu při stanovené okolní teplotě
- stabilizace teploty prostředí
- zamezení vibrací v prostředí
- vhodné upevnění 3D skeneru v nosném zařízení (stativ, mechanická paže)
- zamezení přímému svitu slunečního záření v prostoru skenování
- lepení referenčních značek (v případě volby příslušného skenovacího módu)

7.1.3 Příprava objektu

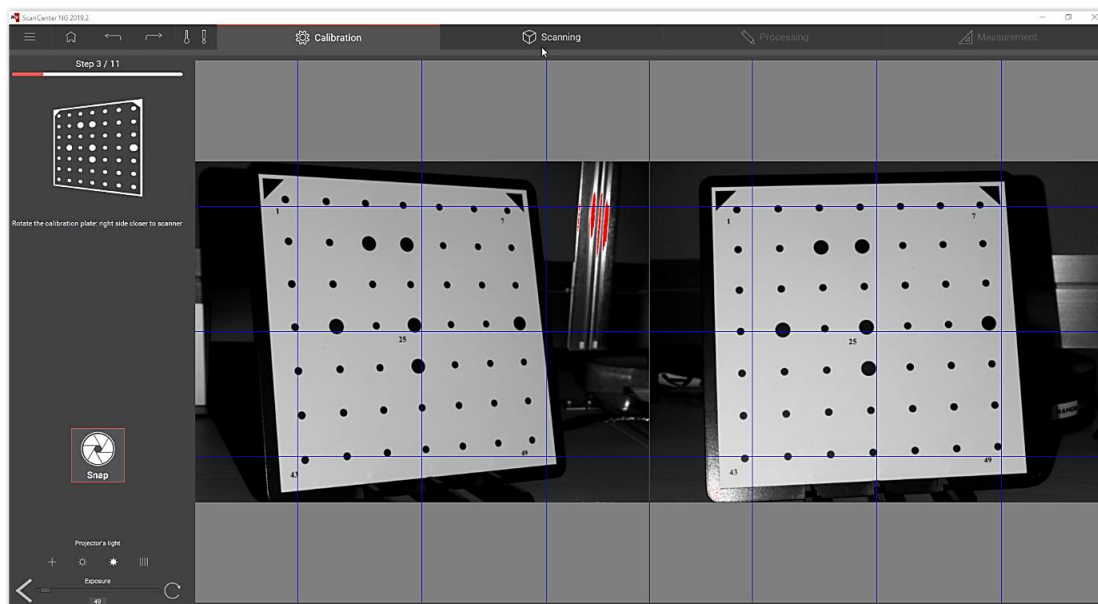
Kvalita výsledků u optického 3D skenování je velmi závislá na samotném povrchu objektu. Čím preciznější je příprava objektu a zajištění stabilních podmínek pro skenování, tím kvalitnější jsou naskenovaná data.

- očištění povrchu objektu
- nanesení matného nátěru (v případě obtížně skenovatelných povrchů)
- zhodnocení nastavení polohy objektu a 3D skeneru
- zajištění tvarové stálosti objektu po celou dobu skenování

7.1.4 Kalibrace (seřízení)

Kalibrační proces probíhá zvolením kalibrační desky, dle skenovací zóny. Skenovací zóna se volí především v návaznosti na velikost objektu a dále dle požadavků na přesnost či rozlišení. Samotnou kalibraci předchází nastavení 3D skeneru. Je třeba nastavení kamer do správné pozice a zaostřit kamery i projektor na danou vzdálenost. Následuje přizpůsobení intenzity světla, ať už okolí nebo regulací na objektivu kamer.

Samotná kalibrace je založena na polohování kalibrační desky v jedenácti pozicích. Z každé pozice je vytvořen snímek a na konci celého procesu je softwarem vypočtena odchylka v pixlech. Pokud je odchylka menší jak 0,05 pixlů, proběhla kalibrace a celé nastavení 3D skeneru v pořádku a může se přejít do samotného skenování. V opačném případě je třeba kontrola a případná změna nastavení a opakování kalibrace.



Obrázek 14: Kalibrační proces v softwaru [vlastní]

7.1.5 Skenování (postup)

V prvním kroku je třeba rozhodnout, jakou metodou bude objekt skenován. Metoda se odvíjí od způsobu registrace jednotlivých snímků. Vše je závislé především na celkové geometrii a velikosti objektu.

- První metodou je skládání snímků pouze na základě geometrie objektu. Společná část snímků je složena na základě podobnosti geometrického tvaru pomocí alespoň tří zvolených bodů. V této metodě nemusí být ale zajištěna dostatečná přesnost registrací.
- Druhý způsob je skenování s referenčními značkami. Tyto značky o určitém průměru jsou umístěny na objekt nebo na podložku pod objektem a jednotlivé snímky jsou registrovány dle rastru referenčních značek. Tady je třeba po každém snímku přesunout skener nebo objekt do další pozice tak, že při dalším snímku musí být naskenována část značek z předchozího skenu. Tato metoda patří zpravidla mezi nejpřesnější a lze díky ní skenovat i objekty větších rozměrů.
- Další metodou je skenování na automatické otočné podložce. Podložka je se skenerem zkalibrována tak, že software skeneru zná souřadnicový systém stolu. Poté jsou všechny snímky při skenování automaticky registrovány a po zvolení počtu otočení probíhá celý skenovací proces automaticky. Počet otočení, tedy i pořízených snímků je volen dle geometrie objektu. Výhody skenování s automatickou otočnou podložkou jsou v rychlosti, komfortu práce a zároveň při zajištění přesnosti.

Ať už je zvolena jakákoliv metoda, je nutné pro zajištění kvality snímků zvolit také vhodný úhel skeneru a pozice objektu. Dle zákona je úhel odrazu roven úhlu dopadu, proto kamera získá nejlepší kvalitu při odrazu promítaného vzoru, přímo na ni. Po nasbírání dostatečného množství dat následuje jejich zpracování do výsledného 3D modelu.

7.1.6 Zpracování 3D dat

Zpracování naskenovaných dat lze provést v obslužném softwaru RangeVision ScanCenter jak v manuálním, tak i v automatickém módu. Nejprve je třeba naskenovaná data očistit vhodnými nástroji a poté složit jednotlivé skeny či skupiny skenů. Před vygenerováním polygonové sítě je nutné provést tzv. globální registraci. V obecném významu ji lze popsat jako finální registrace či propojení mračen bodů pro zajištění nejvyšší přesnosti. Pokud je zjištěn jakýkoliv nedostatek v naskenovaných datech či chybějící část dat, je možné kdykoli tato data doplnit dalším snímkem z příslušného místa. Mezi poslední kroky zpracování dat je převod mračna bodů do polygonové sítě. Editace polygonů je celkově náročný proces, mezi základy tohoto procesu lze zařadit optimalizaci neboli zjednodušení polygonů. Tímto krokem dojde k celkovému vyhlazení modelu i k výraznému snížení objemu dat. Další, sofistikovanější funkce jsou dostupné většinou ve specializovaných softwarech a obslužné softwary tyto složité funkce často vůbec nenabízí.

Po vytvoření výsledného 3D modelu (polygonové sítě) lze data exportovat do běžných formátů STL, OBJ nebo PLY.

7.1.7 Rozměrová kontrola

V obslužném softwaru tohoto 3D skeneru se nachází pouze základní nástroje měření k orientačnímu měření naskenovaných dat. Lze do softwaru ale také importovat CAD model pro základní porovnání s naskenovanými daty, metodou best-fit. Výstupem z tohoto kontrolního měření je jednoduchá barevná mapa odchylek. Pro profesionální funkce měření lze využít externí softwary.

7.2 ZG AtlaScan



Obrázek 15: 3D skener ZG AtlaScan [40]

Mobilní skenovací zařízení od čínské firmy ZG vyniká přesností, rozlišením, rychlostí, ale také skvělým designem. Tento skener podtrhuje aktuální směr dnešní doby v oblasti skenování. Mobilní laserový 3D skener není náchylný na okolní podmínky, jako optická zařízení, a dokonce dokáže skenovat i velmi lesklé či černé objekty. Konkrétně model AtlaScan disponuje vysokou rychlostí skenování i celou řadou nastavení, která dělají z tohoto skeneru

velmi univerzální technologii pro skenování malých i velkých objektů. Principem zařízení je laserová triangulace, přičemž je využíván modrý laser. Skener je výrobcem certifikován pro metrologické použití, avšak ne dle směrnice VDI/VDE, která je využívána v Evropě. Tuto certifikaci by však měl zařídit distributor nebo prodávající, pokud je požadována zákazníkem.

7.2.1 Technické parametry

Rychlost měření: až 1 600 000 měření/s

Velikost skenovací zóny: až 500 x 550 mm

Laser: 26 promítaných linek (standardní mód), 14 promítaných linek (detailní mód), 1 promítaná linka (skenování děr a špatně přístupných prostor)

Třída laseru: 2 (bezpečné pro oči)

Rozlišení: až 0,01 mm

Přesnost: až 0,01 mm

Připojení: USB 3.0

Výstupní formáty: .stl, .obj, .asc, .ply, .txt, .xyz

7.2.2 Podmínky pro skenování

Laserová technologie má obrovskou výhodu v nízké citlivosti na lesklé a některé černé materiály a tím není potřeba velkých příprav povrchů skenovaných objektů. Matnicí nástřik je třeba použít u transparentních materiálů a dále v individuálních případech, dle kvality skenů. Naopak časová náročnost tkví v lepení referenčních značek, které je nutné umístit v případě laserového skenování vždy.

- kalibrace zařízení
- stabilní teplota prostředí
- lepení referenčních značek (vždy)

7.2.3 Kalibrace (seřízení)

Kalibrace neboli seřízení skeneru probíhá polohováním skeneru nad kalibrační deskou. Skener je posouván do 24 poloh s měnící se vzdáleností, úhlem či natočením skeneru vůči kalibrační desce. Vše je animováno v softwaru a skener při tomto procesu následuje ukazatel polohy, přičemž dojde ke změně, právě tehdy, když je dosaženo ideální polohy. Pro správnou polohu skeneru je také nutné hlídat tři indikátory po stranách animované kalibrační desky. Výsledek kalibrace by měl být menší jak 0,05 mm a v opačném případě je nutné kalibrační proces opakovat.

7.2.4 Skenování (postup)

Samotné skenování s mobilním 3D skener je velmi rychlý proces. Pohybem skeneru dochází k postupnému nabírání dat. Pohyb skeneru probíhá tak, aby byla nasnímána data z vícero úhlů, pro jejich kompletnost. Pokud jsou data kompletní, objekt je umístěn do další polohy či vícero poloh, aby byly naskenovány zbývající části.

7.2.5 Zpracování

Následně po naskenování jsou data učištěna. Všechny skupiny se následně spojí pomocí geometrie objektu či pomocí referenčních značek a poté je třeba zkontrolovat kvalitu dat a jejich úplnost. Posledním krokem je vygenerování výsledného 3D modelu.

Výsledek je možné exportovat do běžných výstupních formátů.

7.2.6 Rozměrová kontrola

Součástí obslužného softwaru 3D skeneru ZG AtlaScan je i modul s funkcemi pro rozměrovou kontrolu. Také lze importovat CAD data, které je možné porovnávat s naskenovanými daty hned několika metodami, včetně ustavení na RPS body. Dále je možné vytvářet i základní elementy, tedy plochy, které jsou proloženy 3D skenem.

7.3 Mechanické dotykové rameno Hexagon Absolute Arm 8312-6



Obrázek 16: Mechanické dotykové rameno Hexagon Absolute Arm 8312-6 [37]

Toto přenosné měřicí rameno patří mezi základní modely od společnosti Hexagon. Jeho přednosti jsou v širokém množství volitelného příslušenství k zajištění pohodlí a zvýšení přesnosti zařízení. Lze vybírat téměř ze 100 druhů různých sond, které umožňují variabilitu měření pro jakoukoliv geometrii objektu. Zároveň je možná jednoduchá výměna sondy, bez re- kalibrace či složitého nastavení zařízení. Design ramene je navržen pro pohodlné ovládání a také rychlost měření. Rameno je vyrobeno z vysoce kvalitního karbonového vlákna s vysokou pevností a tepelnou stabilitou. Systém je certifikován dle normy ISO 10360-8 příloha D.

7.3.1 Technické parametry

Maximální přípustná chyba sondy: 0,008 mm

Maximální přípustná podélná chyba měření: 0,024 mm

Maximální přípustná odchylka sondy – velikost: 0,010 mm

Maximální přípustná odchylka sondy – tvar: 0,018 mm

Maximální přípustná odchylka sondy – poloha: 0,021 mm

Provozní teplota: +5° až +40°

Maximální dosah: 1,49 m

Hmotnost: 12 kg

7.3.2 Podmínky pro měření

S ohledem na princip a postup měření s mechanickým dotykovým ramenem je nutné zajistit k dosažení přesných výsledků tyto podmínky.

- umístění ramene v prostředí bez vibrací a pouze v interiéru
- fixace měřeného objektu a to i z hlediska jeho tvarové stability
- teplotní stabilita prostředí i dílu
- volba dotykové sondy v návaznosti na velikost a tvar měřených parametrů

7.3.3 Kalibrace (seřízení)

Seřízení ramene je prováděno pomocí kalibrační koule, u které je měřena její poloha daným snímačem. Tento proces je opakován tehdy, kdy došlo k výrazné změně okolních podmínek. Při výměně dotykové sondy není třeba kalibrace, protože systém sám rozpozná, jaká sonda je k rameni připojena.

7.3.4 Měření (postup) a vyhodnocení

Prvním krokem procesu je nahrání CAD modelu do ovládacího softwaru. Poté je třeba nadefinovat prvky pro vyrovnání součásti, které je dáno výkresem nebo jinými požadavky.

Následuje definice prvků, které budou měřeny. U těchto prvků je určeny i parametry, jakými jsou například počet dotyků či jejich rozmístění. Při vlastním měření je vhodné tyto zvolené parametry dodržovat, ale není to nutné zcela, aby měření bylo co nejkomplexnější.

Posledním krokem je vygenerování měřicího protokolu, který nese informaci o jmenovité hodnotě i naměřené odchylce.

8 PROCES SKENOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ

8.1 Měřený objekt

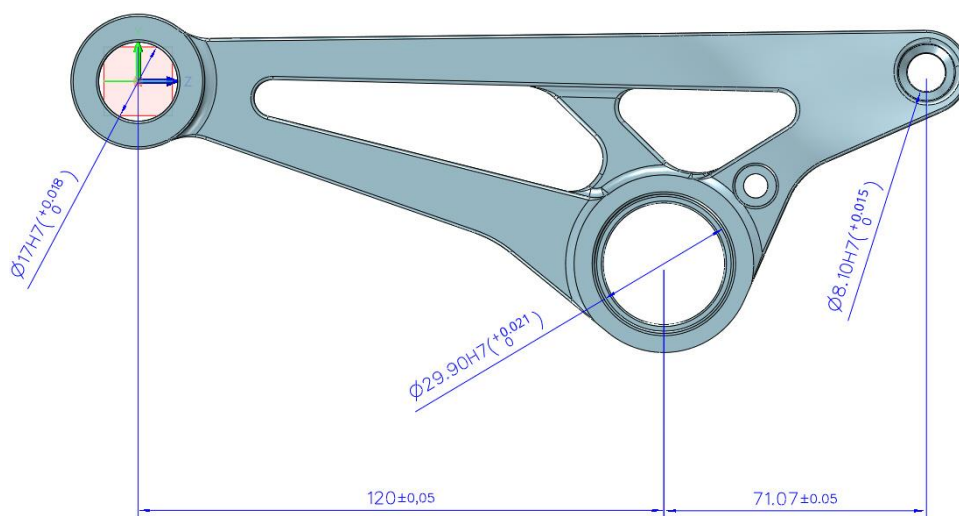
Jako objekt k měření a porovnání všech tří zařízení byl vybrán spojovací prvek (konzole) z celoodpruženého jízdního kola. Tento prvek slouží ke spojení zadního tlumiče a zadní stavby kola, přičemž je uchycen k sedlové trubce. Vše poté slouží k přenosu odpružení zadního kola pro zvýšení jízdního komfortu cyklisty.



Obrázek 17: Součástka z celoodpruženého jízdního kola [vlastní]

Součástka byla poskytnuta výrobcem jízdních kol bez jakékoliv technické dokumentace a informací o materiálu.

Pro měření bylo vybranych pět parametrů, a sice průměry tří děr ($D1 = 30\text{ mm}$, $D2 = 17\text{ mm}$, $D3 = 8,10\text{ mm}$) a dvě rozteče mezi nimi $D1 - D2$ (rozteč $L1 = 120\text{ mm}$) a $D1 - D3$ (rozteč $L2 = 71,07\text{ mm}$). Dále pak dle způsobu uchycení součástky a její funkci jsem zvolil uložení děr a tolerance roztečí.



Obrázek 18: CAD model se základními rozměry pro měření[vlastní]

8.2 3D skener RangeVision PRO



Obrázek 19: Podmínky pro 3D skenování se skenerem RangeVision PRO [vlastní]

8.2.1 Příprava

Příprava ke skenování s optickým přístrojem RangeVision PRO nese především proces úpravy povrchu zmatněním, protože objekt ke skenování je černý, tedy obtížně skenovatelný. Pro zmatnění povrchu byl použit klasický křídový sprej ve velmi tenké vrstvě, se snahou o co největší homogenitu nástřiku.

Dále bylo nutné vytemperovat místnost pro skenování i samotný objekt na stabilní teplotu a zajistit neměnnost okolního světla. Místnosti, která slouží ke skenování, jsou zároveň zamezeny veškeré vlivy, které by mohly jakýmkoliv způsobem narušit proces skenování a kvalitu skenu.

Kalibrace (seřízení) přístroje je nutné provést vždy, když dojde ke změně okolních podmínek nebo když je provedena změna skenovacího objemu. V této situaci nastaly obě skutečnosti a proto bylo nutné 3D skener seřadit na správné parametry.

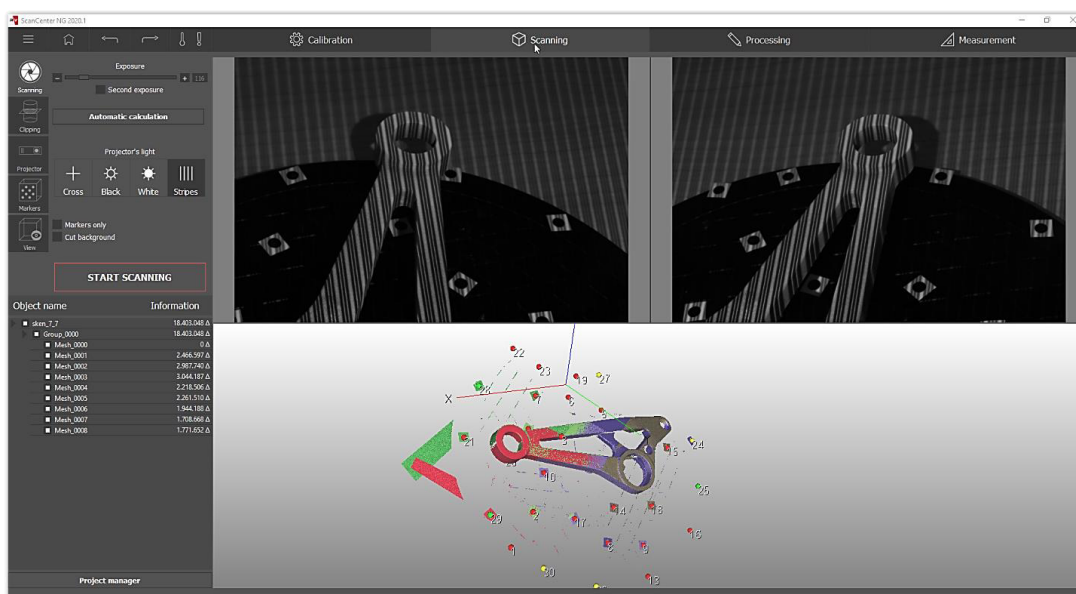
Jako poslední úkon byla provedena příprava skenovací podložky. Jako skenovací metoda bylo zvoleno skenování s referenčními značkami. Vzhledem k velikosti a tvaru skenované součástky je technicky možné umístit značky pouze na podložku pod skenovaným objektem. Barvu podložky je možné zvolit černou nebo lesklou, díky čemuž odpadá nutnost odstraňování této plochy po naskenování objektu.

8.2.2 Proces 3D skenování

Před samotným procesem skenování objektu byly nejprve naskenovány pouze značky na podložce. Tento rastr značek je možné uložit a kdykoli nahrát do nového projektu. Tím je zajištěno pohodlí a zvýšení rychlosti při skenovacím procesu. Ve chvíli, kdy jsou značky skenovány nově spolu s objektem, je nutné skenovat vždy minimálně čtyři značky z předchozího skenu. Pokud je rastr nahraný do projektu hned na začátku, tato nutnost tím odpadá a obsluha 3D skeneru má poté větší volnost při práci a urychlí proces tím, že pořídí je minimum potřebných skenů.

Skenování s referenčními značkami také umožňuje větší flexibilitu pro nastavení skeneru při daném skenu. Před každým skenem je možné změnit polohu skeneru a poté hned pořídít snímek.

Proces skenování byl v tomto případě rozdělen do tří skupin skenů, přičemž dvě skupiny obsahovaly v průměru každá deset skenů a třetí skupina sloužila ke zvýšení míry přesnosti u parametru šířky objektu. Tato skupina obsahovala jen část objektu s referencí šířky a obsahovala tím pádem méně skenů, a to pět.



Obrázek 20: Náhled procesu 3D skenování v softwaru RangeVision ScanCenter [vlastní]

Důraz byl kladen na kvalitu skenování děr, které jsou v této práci vyhodnocovány. Při skenování děr je úhel skeneru nastaven tak, aby mohl pořídít záznam vnitřní ploch z co nejhlubší části.

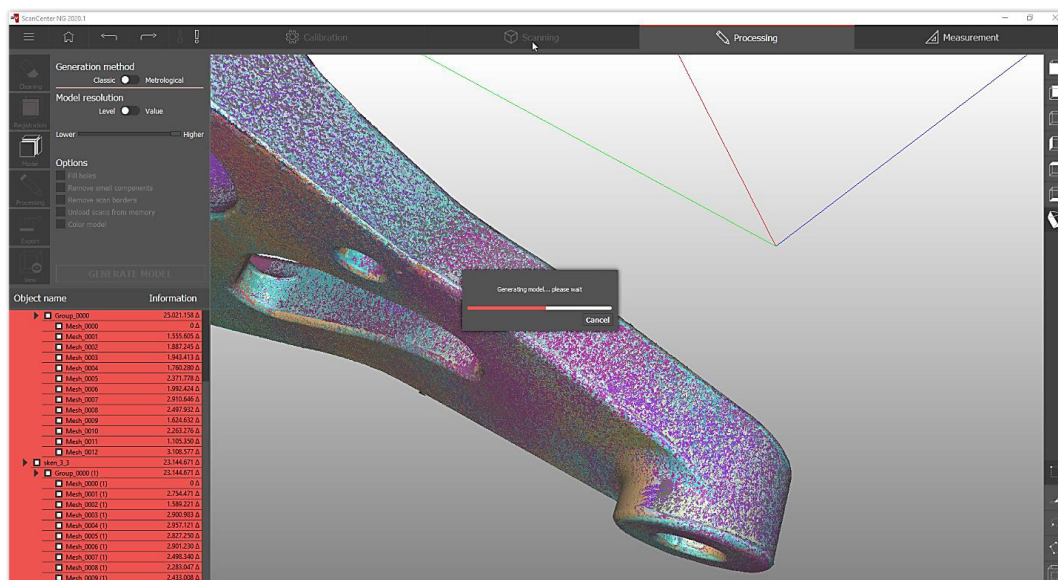
Po naskenování byly všechny skupiny jednotlivě ukládány a poté zpětně naimportované do jednoho projektu, ke spojení a zpracování.

8.2.3 Zpracování

Před samotným spojením jednotlivých skupin bylo nutné vymazat u každé skupiny skenů přebytečné části a okolní šum.

Ovládací software skenerů RangeVision obsahuje funkce pro automatické skládání skenů a skupin, čímž je uživateli opět velmi usnadněna práce. Tato funkce spolehlivě fungovala i pro spojování skenů součástky z jízdního kola.

V závěrečné fázi zpracování proběhla globální registrace, poté vygenerování polygonové sítě a v úplném závěru export do výstupního .stl formátu.

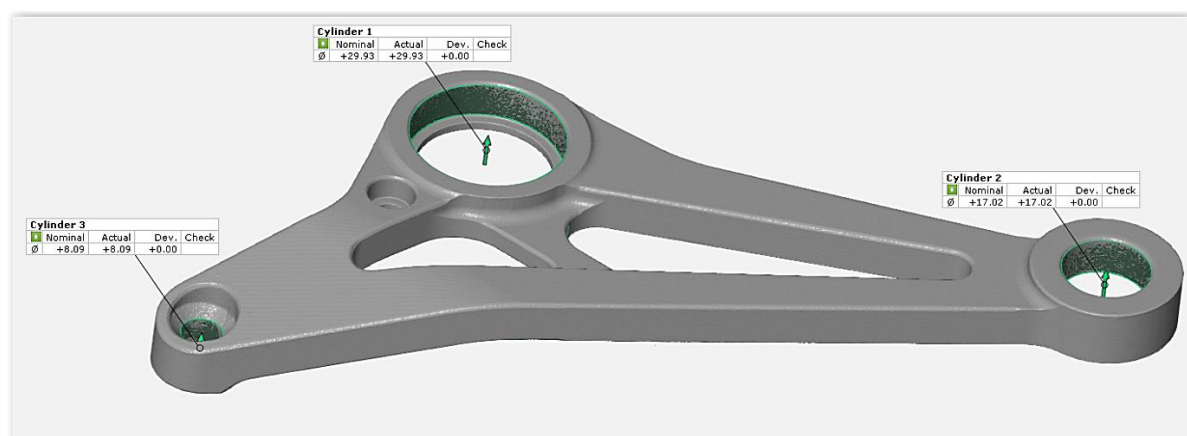


Obrázek 21: Proces zpracování dat v softwaru RangeVision ScanCenter [vlastní]

8.2.4 Vyhodnocení

Pro samotné měření určených parametrů byl využit externí software GOM inspect. Ten skrývá mnoho profesionálních funkcí a metod pro rozměrovou kontrolu naskenovaných dat.

Jako metoda pro vyhodnocení parametrů u naskenované součástky bylo zvoleno měření pomocí vytvořených elementů (válec, bod, přímka). Nejprve jsou vytvořeny válcové elementy v měřených dírách. Ty jsou ustavené metodou best-fit do naskenovaných dat.

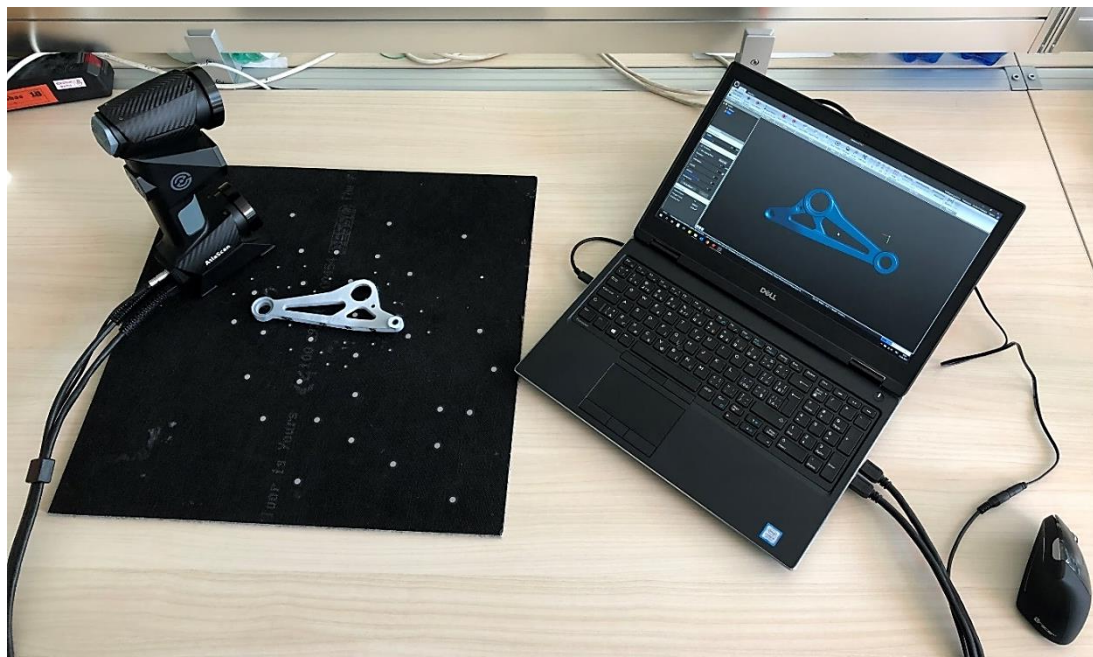


Obrázek 22: Vyhodnocení výsledků v softwaru GOM inspect [vlastní]

Poté následuje vytvoření bodů, které protínají horní plochu válce a středovou osu. Pomocí těchto bodů jsou dále vytvořeny dvě úsečky. Délka těchto úseček vyjadřuje měřenou vzdálenost rozteče mezi dírami 1-2 a 1-3.

Naměřené hodnoty jsou zaneseny do tabulky v programu Microsoft Excel a dále zpracovány.

8.3 3D skener ZG AtlaScan



Obrázek 23: Podmínky pro skenování s laserovým 3D skenerem [vlastní]

8.3.1 Příprava

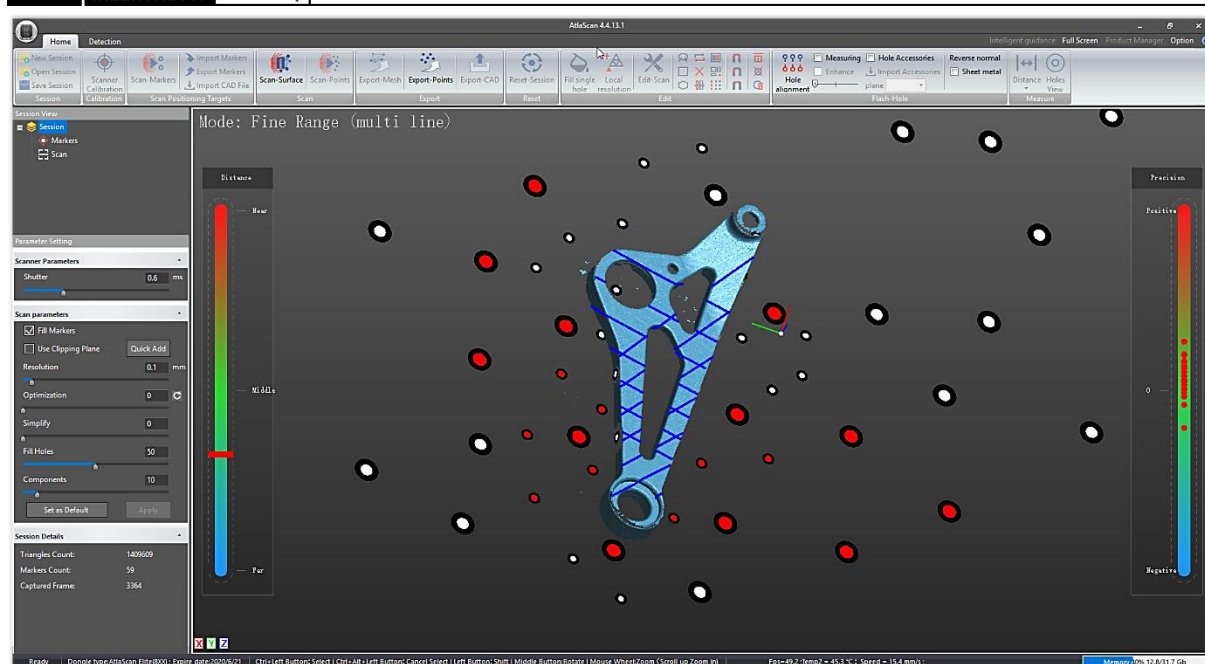
Laserový skener lze snadno přizpůsobit skenovanému povrchu, ale obdobně jako v předchozím v případě, i tady bylo nutné pro zvýšení kvality skenu, objekt opatřit matnicím nástřikem křídového spreje.

Následovalo vytemperování místnosti i součástky na stabilní teplotu a kalibrace (seřízení) přístroje.

Oproti předchozímu případu byla část značek umístěna i na objekt. Tyto značky slouží pro orientaci přístroje při spojování druhé skupiny skenů.

8.3.2 Proces 3D skenování

Objekt a jeho tvar dovolují skenování pouze na dvě skupiny. Po naskenování jedné strany objektu bylo nutné vymazat pouze data podložky spolu se značkami na ní umístěnými. Dále je objekt otočen naskenovanou stranou dolů. Značky umístěné na společné části obou skenů jsou skenerem automaticky detekovány a skenování poté pokračuje až do kompletního naskenování chybějících částí. Při skenování druhé skupiny jsou znovu detekovány a skenovány značky na podložce, které je nutné do ukončení procesu opět odstranit.

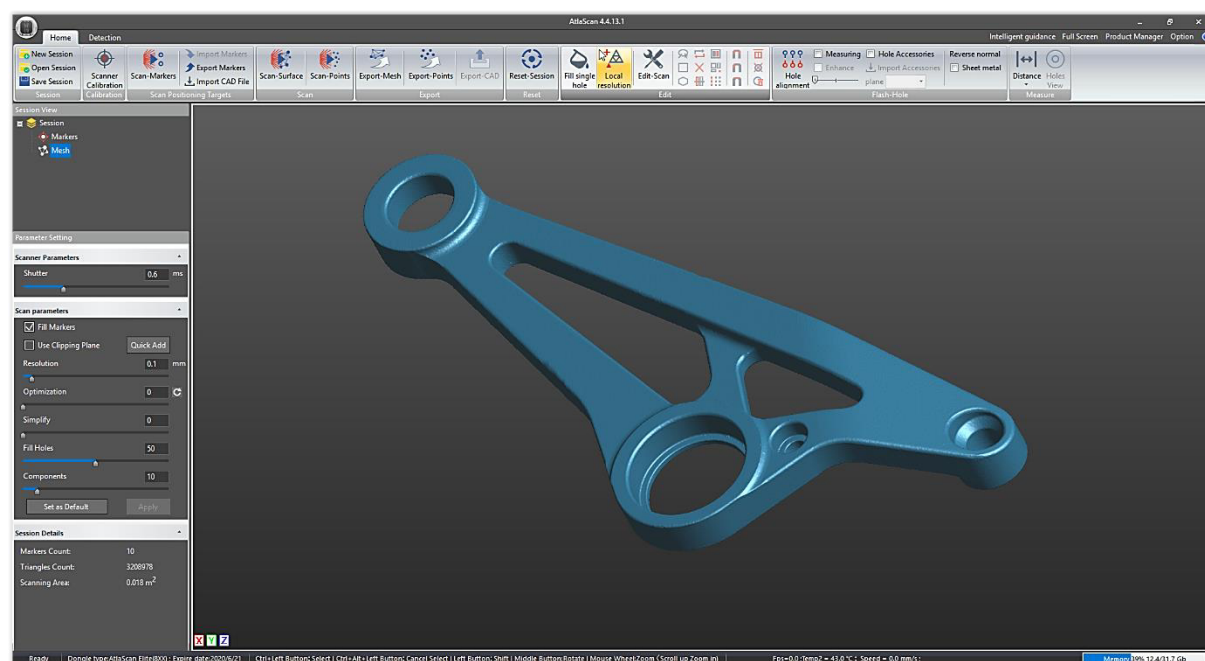


Obrázek 24: Proces 3D skenování laserovým 3D skenerem [vlastní]

8.3.3 Zpracování

Charakter podložky byl zvolen pro jednoduché a rychlé očištění skenů. Černá podložka nebyla ve standardním módu skenování vůbec detekována a proto bylo nutné odstranit pouze naskenované značky.

Odstraněné značky dovolují již generovat výsledný 3D model bez jakýchkoliv úprav a celý proces je tímto velmi urychlen.



Obrázek 25: Výsledný sken 3D skeneru ZG AtlaScan [vlastní]

8.3.4 Vyhodnocení

Postup pro získání hodnot zvolených parametrů proběhl stejným způsobem jako v případě 3D skeneru RangeVision PRO.

8.4 Mechanické měřicí rameno Hexagon Absolute Arm



Obrázek 26: Měření s dotykovým měřicím ramenem Hexagon [vlastní]

8.4.1 Příprava

Pro upnutí součástky byl použit držák mikrometru, který byl zafixován k podložce. Měřená součástka tak byla v ideální poloze pro měření všech tří děr bez nutnosti změny polohy.

Teplota místnosti a součástky byla vytemperována na stabilní teplotu.

Měření bylo provedeno rubínovou kuličkou dotyku o průměru 3 mm, která byla v systému již v systému nastavena z minulosti.

Do ovládacího softwaru byl nahrán CAD model součásti. Dále se definovaly plochy pro ustavení souřadnicového systému a nakonec byly určeny parametry pro měření, včetně jmenovitých hodnot pro přímé vyhodnocení výsledku.

8.4.2 Měření

Měření každé díry, tedy válcové plochy, bylo nastaveno pro dotyk ve čtyřech bodech a dvou řadách. Dotyk v určených bodech je zaznamenáván příslušným tlačítkem a po zaznamenání všech osmi bodů, je vždy výsledek uložen a pokračuje se v měření dalšího parametru. Rozteče mezi dírami jsou vyhodnoceny automaticky v návaznosti na zvolení souřadnicového systému.



Obrázek 27: Dotyková sonda [37]

8.4.3 Vyhodnocení výsledků

Výsledky jsou vyhodnoceny automaticky softwarem a ihned je možné i vytisknout nebo uložit protokol z měření. Protokol lze volit pouze textový nebo i s grafickým znázorněním měřené součásti a parametrů.

8.5 Vyhodnocení naměřených dat

Tabulky 2, 3 a 4 znázorňují naměřené hodnoty určených parametrů jednotlivými zařízeními.

Naměřené hodnoty:

D1 – hodnota průměru díry 1 [mm]

D2 – hodnota průměru díry 2 [mm]

D3 – hodnota průměru díry 3 [mm]

L1 – hodnota vzdálenosti mezi dírou 1 a 2 [mm]

L2 – hodnota vzdálenosti mezi dírou 1 a 3 [mm]

8.5.1 Korekce měření

Vzhledem k tomu, že součástka musela být pro optické i laserové 3D skenování opatřena matnícím nástřikem křídového spreje, bylo nutné provést korekci dosažených výsledků.

Výrobce udává hodnota homogenního nástřiku křídového spreje v dostatečné tloušťce pro vyhovující kvalitu skenů je alespoň 0,015 mm. Proto korekce hodnot všech měřených průměrů děr činí 0,03 mm.

8.5.2 Tabulky naměřených hodnot

Tabulka 2: Naměřené hodnoty pomoci RangeVision PRO

RangeVision PRO								
Měření	D1[mm]	D1[mm] edit	D2 [mm]	D2 [mm] edit	D3 [mm]	D3 [mm] edit	L1 [mm]	L2 [mm]
1	29,880	29,910	16,972	17,002	8,039	8,069	120,033	71,689
2	29,910	29,940	16,967	16,997	8,074	8,104	120,012	71,686
3	29,900	29,930	16,990	17,020	8,060	8,090	120,020	71,693
4	29,900	29,930	16,990	17,020	8,060	8,090	120,019	71,682
5	29,900	29,930	16,991	17,021	8,069	8,099	120,044	71,690
6	29,899	29,929	16,985	17,015	8,051	8,081	120,024	71,702
7	29,885	29,915	16,977	17,007	8,044	8,074	120,019	71,689
8	29,892	29,922	17,005	17,035	8,030	8,060	120,022	71,689
9	29,885	29,915	16,940	16,970	8,027	8,057	120,049	71,674
10	29,896	29,926	16,989	17,019	8,065	8,095	120,003	71,682

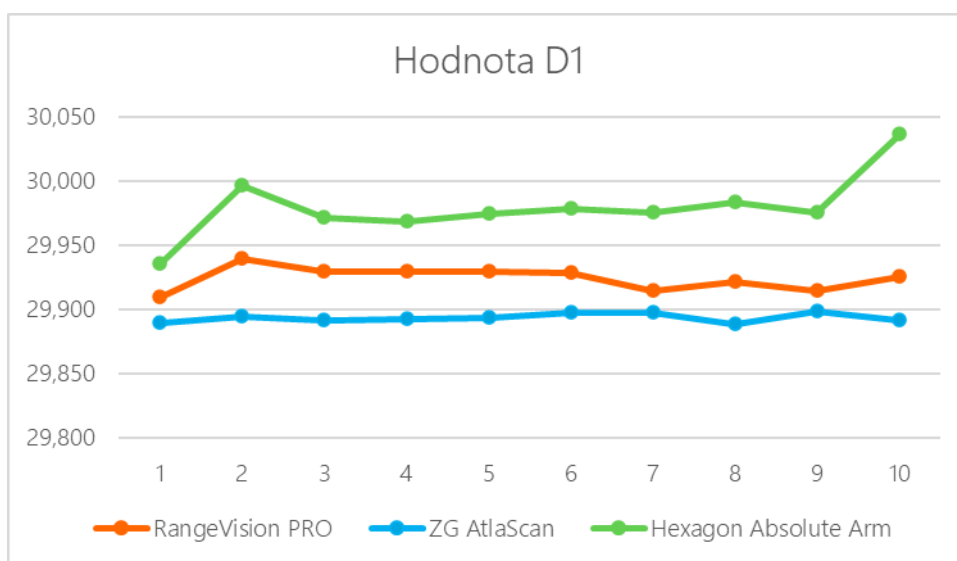
Tabulka 3: Naměřené hodnoty pomocí ZG AtlaScan

ZG AtlaScan								
Měření	D1[mm]	D1[mm] edit	D2 [mm]	D2 [mm] edit	D3 [mm]	D3 [mm] edit	L1 [mm]	L2 [mm]
1	29,860	29,890	16,959	16,989	8,082	8,112	119,984	71,694
2	29,865	29,895	16,960	16,990	8,100	8,130	119,977	71,677
3	29,862	29,892	16,953	16,983	8,110	8,140	119,990	71,685
4	29,863	29,893	16,959	16,989	8,100	8,130	119,991	71,693
5	29,864	29,894	16,959	16,989	8,086	8,116	119,994	71,673
6	29,868	29,898	16,957	16,987	8,099	8,129	119,998	71,650
7	29,868	29,898	16,953	16,983	8,094	8,124	119,991	71,700
8	29,859	29,889	16,966	16,996	8,109	8,139	120,004	71,679
9	29,869	29,899	16,959	16,989	8,104	8,134	120,005	71,689
10	29,862	29,892	16,956	16,986	8,106	8,136	120,001	71,690

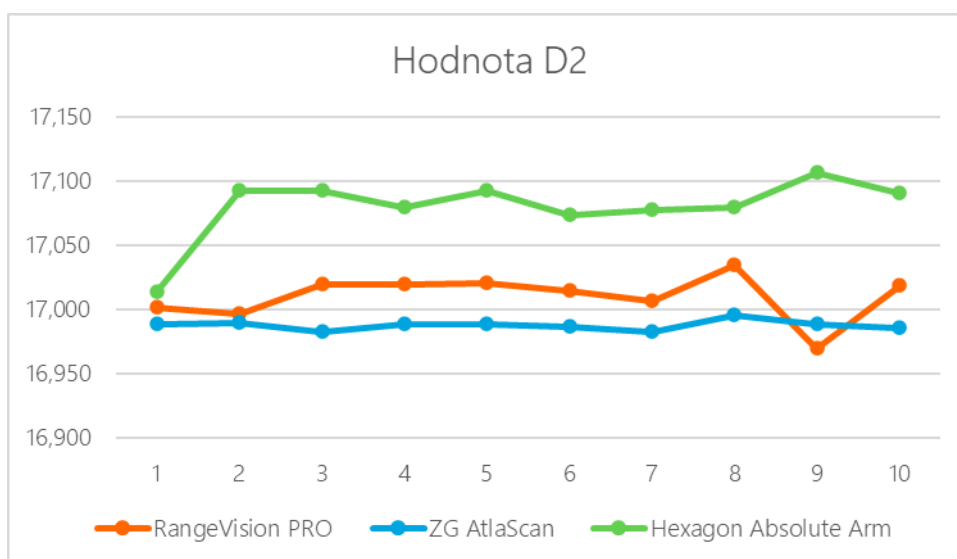
Tabulka 4: Naměřené hodnoty pomocí Hexagon Absolute Arm

Hexagon Absolute Arm					
Měření	D1 [mm]	D2 [mm]	D3 [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]
1	29,906	16,984	8,116	119,959	70,999
2	29,967	17,063	8,134	119,980	71,070
3	29,942	17,063	8,142	119,990	71,019
4	29,939	17,050	8,135	119,993	71,041
5	29,945	17,063	8,125	119,979	70,951
6	29,949	17,044	8,126	119,985	70,900
7	29,946	17,048	8,146	119,988	70,970
8	29,954	17,050	8,134	119,988	71,024
9	29,946	17,077	8,129	119,949	71,069
10	30,007	17,061	8,222	119,998	70,513

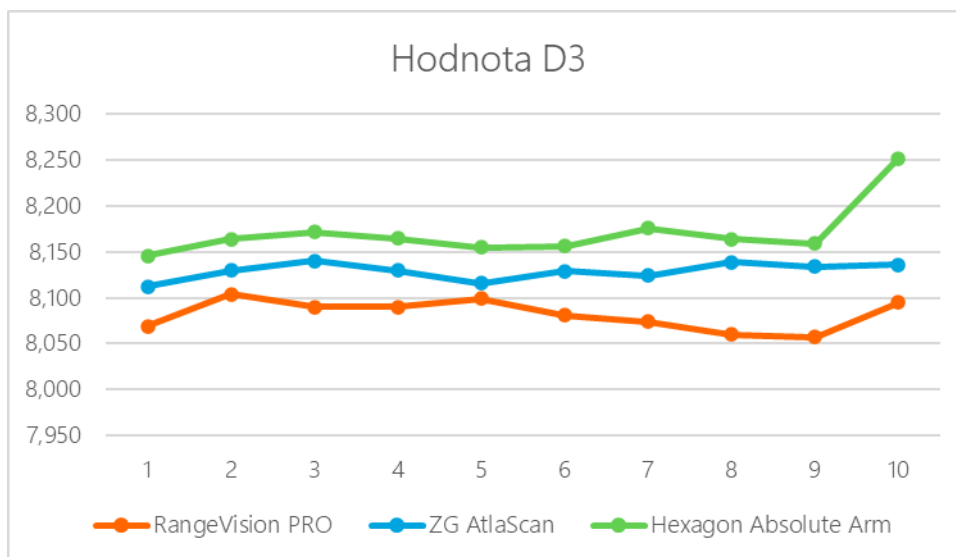
8.5.3 Grafy porovnání naměřených hodnot



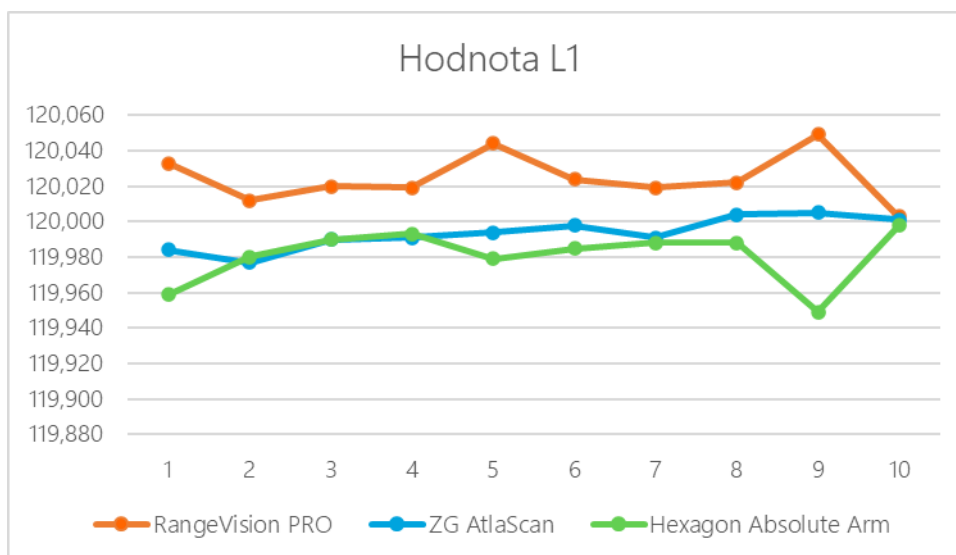
Graf 4: Porovnávací graf hodnoty D1



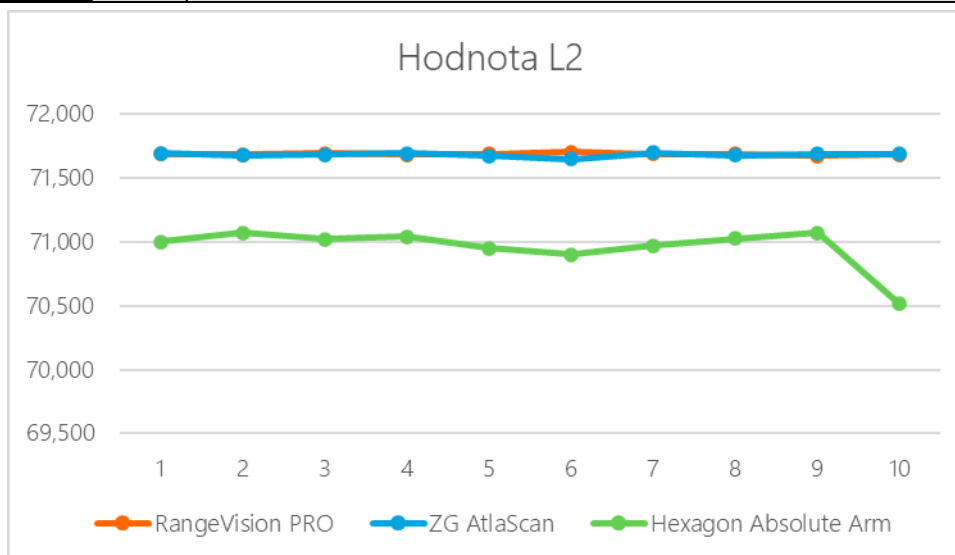
Graf 5: Porovnávací graf hodnoty D2



Graf 6: Porovnávací graf hodnoty D3



Graf 7: Porovnávací graf hodnoty L1



Graf 8: Porovnávací graf hodnoty L2

8.5.4 Statistické vyhodnocení dat

K interpretaci statistických výpočtů jsou vybrány hodnoty průměru díry D1, změřené pomocí 3D skeneru RangeVision PRO

Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} x_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \cdot (29,91 + 29,94 + \dots + 29,93)$$

$$\bar{x} = 29,92 \text{ mm}$$

Tabulka 5: Aritmetický průměr

Aritmetický průměr			
Parametr	RangeVision	ZG	Hexagon
D1 [mm]	29,925	29,894	29,930
D2 [mm]	17,011	16,988	17,050
D3 [mm]	8,082	8,129	8,141
L1 [mm]	120,025	119,994	119,981
L2 [mm]	71,688	71,683	70,956

Směrodatná odchylka

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$s(x) = \sqrt{\frac{(29,91 - 29,92)^2 + (29,94 - 29,92)^2 + \dots + (29,93 - 29,92)^2}{10 - 1}}$$

$$s(x) = 0,00872 \text{ mm}$$

Tabulka 6: Výběrová směrodatná odchylka

Výběrová směrodatná odchylka			
Parametr	RangeVision	ZG	Hexagon
D1 [mm]	0,00913	0,00346	0,02524
D2 [mm]	0,01792	0,00375	0,02528
D3 [mm]	0,01637	0,00931	0,02976
L1 [mm]	0,01398	0,00886	0,01542
L2 [mm]	0,00744	0,01430	0,16433

Nejistoty výsledků měření

Výpočet standardní nejistoty typu A

V návaznosti na fakt, že byl měřen pouze jeden vzorek součástky, výpočet standardní nejistoty typu A je proveden standardním způsobem, jako výběrovou směrodatnou odchylku aritmetického průměru naměřených hodnot.

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)}}$$

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{(29,91 - 29,92)^2 + (29,94 - 29,92)^2 + \dots + (29,93 - 29,92)^2}{10(10 - 1)}}$$

$$u_A = 0,00291 \text{ mm}$$

Tabulka 7: Standardní nejistota typu A

Standardní nejistota typu A			
Parametr	RangeVision	ZG	Hexagon
D1 [mm]	0,00289	0,00110	0,00798
D2 [mm]	0,00567	0,00119	0,00799
D3 [mm]	0,00518	0,00294	0,00941
L1 [mm]	0,00442	0,00280	0,00488
L2 [mm]	0,00235	0,00452	0,05197

Výpočet standardní nejistoty typu B

Dle příručky VDA – 5 je stanoveno, že výpočet složky nejistoty je možné modifikovat či zjednodušit, pokud je doložena a dokumentována hodnota MPE. Pro tento případ je výpočet této nejistoty následující.

MPE – maximální dovolená chyba měřicího přístroje

$$u_B = \frac{MPE}{\sqrt{3}}$$

$$u_B = \frac{0,018}{\sqrt{3}}$$

$$u_B = 0,01039 \text{ mm}$$

Tabulka 8: Standardní nejistota typu B

Standardní nejistota typu B			
Parametr	RangeVision	ZG	Hexagon
Nejistota U_B [mm]	0,01039	0,00577	0,00462

Výpočet kombinované standardní nejistoty

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

$$u_C = \sqrt{0,00291^2 + 0,01039^2}$$

$$u_C = 0,01079 \text{ mm}$$

Tabulka 9: Standardní kombinovaná nejistota

Standardní kombinovaná nejistota			
Parametr	RangeVision	ZG	Hexagon
D1 [mm]	0,01079	0,00588	0,00922
D2 [mm]	0,01184	0,00589	0,00923
D3 [mm]	0,01161	0,00648	0,01048
L1 [mm]	0,01129	0,00642	0,00672
L2 [mm]	0,01066	0,00733	0,05217

Výpočet celkové rozšířené nejistoty

Pro výpočet celkové rozšířené nejistoty měření byl zvolen koeficient rozšíření $k = 2$, s pravděpodobností pokrytí $p = 95,45 \%$.

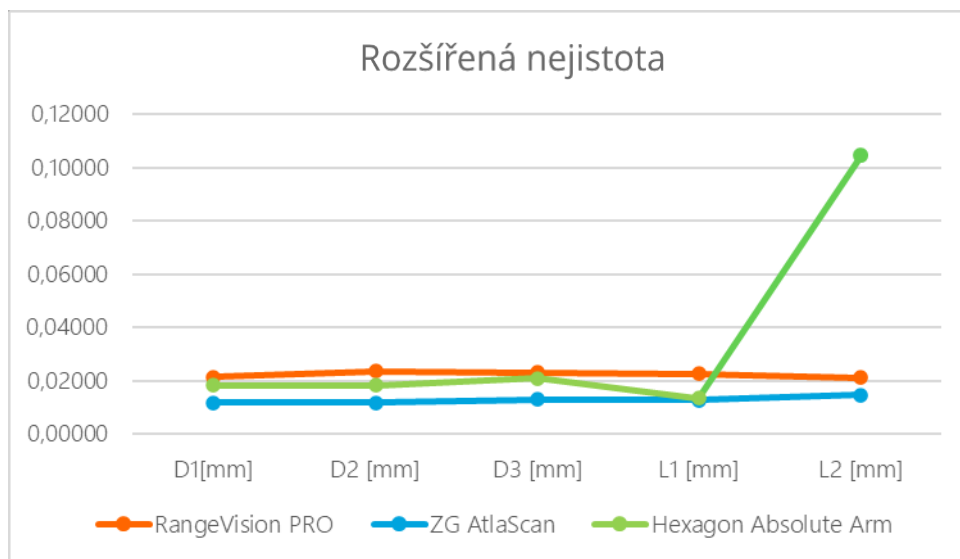
$$U = k \cdot u_C$$

$$U = 2 \cdot 0,01079$$

$$U = 0,02158 \text{ mm}$$

Tabulka 10: Standardní celková rozšířená nejistota

Standardní celková rozšířená nejistota			
Parametr	RangeVision	ZG	Hexagon
D1 [mm]	0,02157	0,01175	0,01844
D2 [mm]	0,02367	0,01179	0,01847
D3 [mm]	0,02322	0,01296	0,02097
L1 [mm]	0,02259	0,01283	0,01343
L2 [mm]	0,02131	0,01467	0,10434



Graf 9: Rozšířená nejistota

8.6 Výsledky měření

Tabulka 11: Konečné výsledky naměřených hodnot pro RangeVision

Konečné výsledky naměřených hodnot		
Parametr	RangeVision	Hodnocení
D1 [mm]	29,925±0,022	Hodnota mimo toleranční pole Nejistota měření větší jak toleranční pole
D2 [mm]	17,011±0,024	Nejistota měření větší jak toleranční pole
D3 [mm]	8,082±0,024	Hodnota mimo toleranční pole Nejistota měření větší jak toleranční pole
L1 [mm]	120,025±0,023	Shoda, viz pole shody
L2 [mm]	71,688±0,021	Shoda, viz pole shody

Tabulka 12: Konečné výsledky naměřených hodnot pro ZG AtlaScan

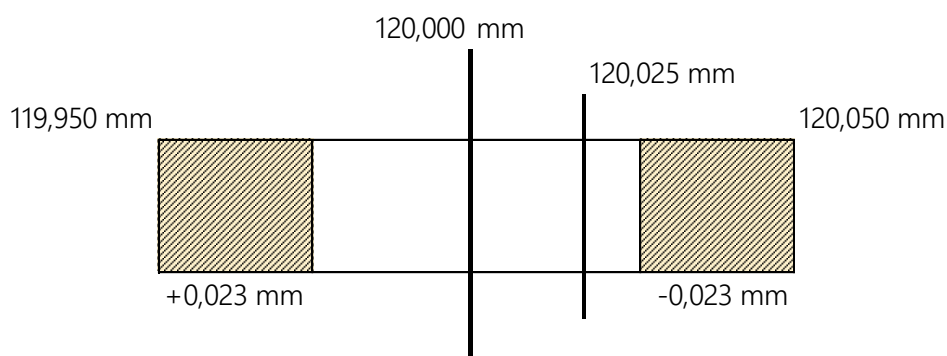
Konečné výsledky naměřených hodnot		
Parametr	ZG	Hodnocení
D1 [mm]	29,894±0,012	Hodnota mimo toleranční pole
D2 [mm]	16,988±0,012	Hodnota mimo toleranční pole
D3 [mm]	8,129±0,013	Hodnota mimo toleranční pole
L1 [mm]	119,994±0,013	Shoda, viz pole shody
L2 [mm]	71,683±0,015	Shoda, viz pole shody

Tabulka 13: Konečné výsledky naměřených hodnot pro Hexagon Absolute Arm

Konečné výsledky naměřených hodnot		
Parametr	Hexagon	Hodnocení
D1 [mm]	29,950±0,019	Hodnota mimo toleranční pole
D2 [mm]	17,050±0,019	Hodnota mimo toleranční pole Nejistota měření větší jak toleranční pole
D3 [mm]	8,141±0,021	Hodnota mimo toleranční pole Nejistota měření větší jak toleranční pole
L1 [mm]	119,981±0,014	Shoda, viz pole shody
L2 [mm]	70,956±0,105	Hodnota mimo toleranční pole Nejistota měření větší jak toleranční pole

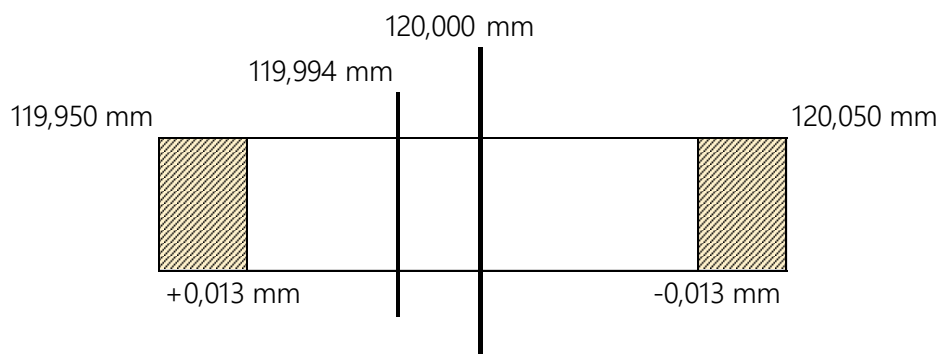
8.6.1 Pole shody

Pole shody pro rozteč děr L1 (RangeVision PRO)



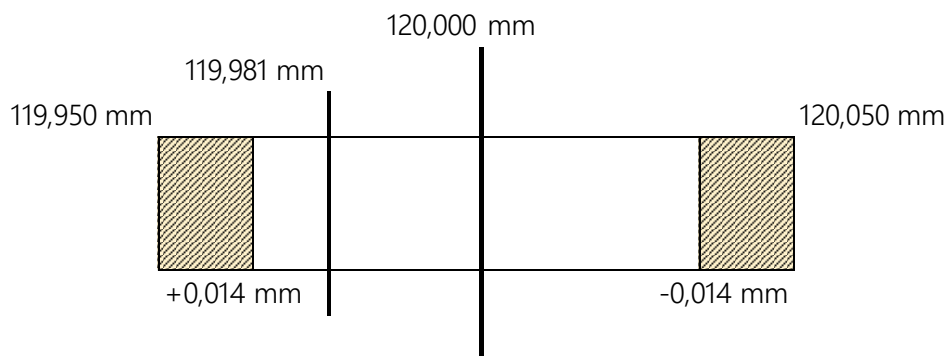
Obrázek 28: Pole shody pro rozteč děr L1 (RangeVision PRO)

Pole shody pro rozteč děr L1 (ZG AtlaScan)



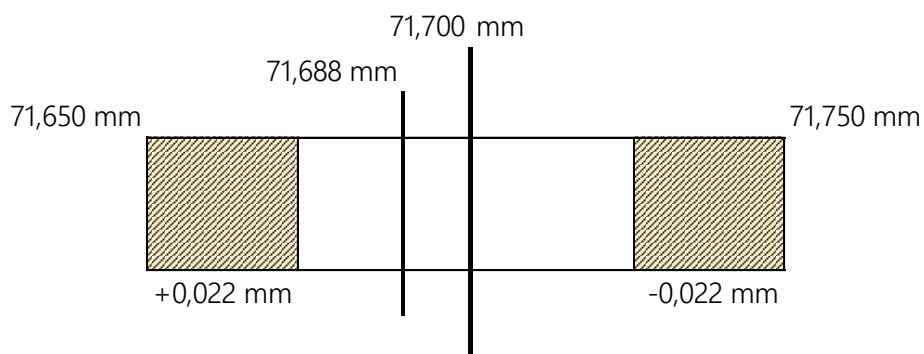
Obrázek 29: Pole shody pro rozteč děr L1 (ZG AtlaScan)

Pole shody pro rozteč děr L1 (Hexagon Absolute Arm)



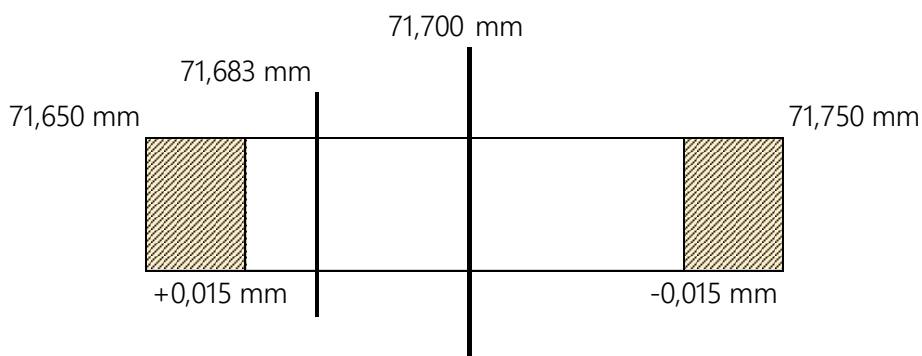
Obrázek 30: Pole shody pro rozteč děr L1 (Hexagon Absolute Arm)

Pole shody pro rozteč děr L2 (RangeVision)



Obrázek 31: Pole shody pro rozteč děr L2 (RangeVision)

Pole shody pro rozteč děr L2 (ZG AtlaScan)



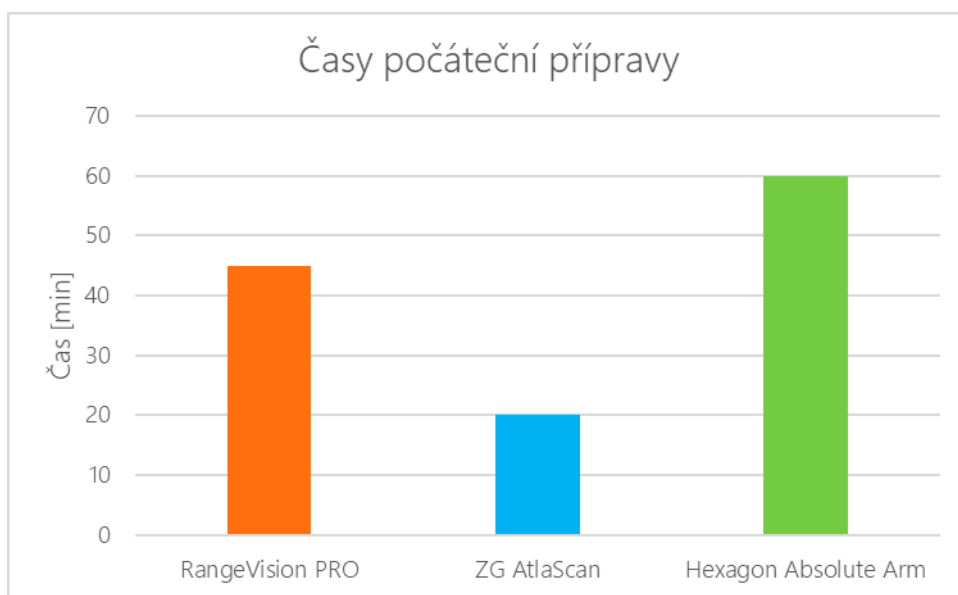
Obrázek 32: Pole shody pro rozteč děr L2 (ZG AtlaScan)

8.7 Časová náročnost procesů

8.7.1 Časy přípravy

Tabulka 14: Časy počáteční přípravy

Časy počáteční přípravy	
Zařízení	Čas [min]
RangeVision PRO	45
ZG AtlaScan	20
Hexagon Absolute Arm	60



Graf 10: Časy počáteční přípravy

8.7.2 Časy měření a vyhodnocení

Tabulka 15: Časy měření pro RangeVision PRO

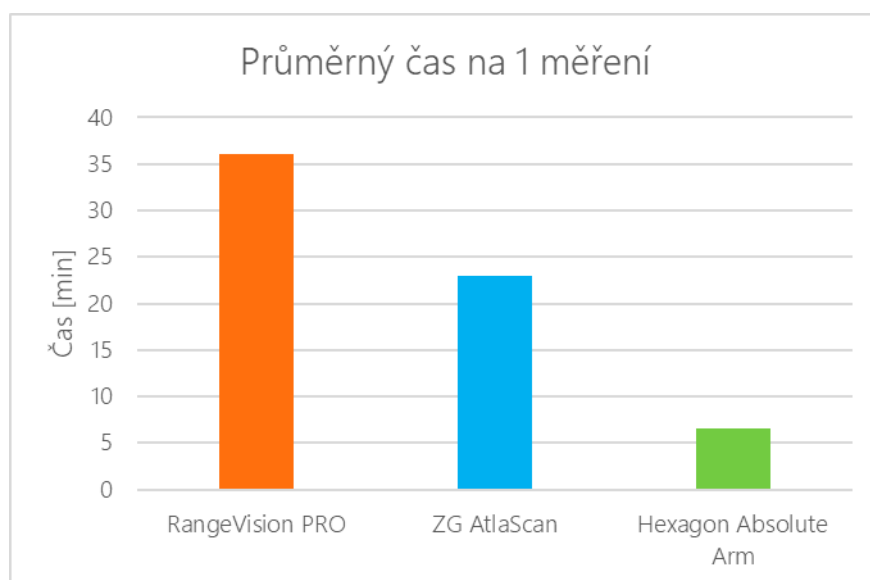
RangeVision PRO											
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr/1 měření
čas [min]	38	39	35	34	37	39	35	34	34	36	36,1

Tabulka 16: Časy měření pro ZG AtlaScan

ZG AtlaScan											
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr/1 měření
čas [min]	26	22	20	24	24	23	24	25	22	20	23

Tabulka 17: Časy měření pro Hexagon Absolute Arm

Hexagon Absolute Arm											
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr/1 měření
čas [min]	7	8	8	6	5	7	5	8	7	5	6,6



Graf 11: Průměrný čas na jedno měření

Z průměrných časů na jedno měření a časů příprav je patrné, že dotyková technologie jasně převyšuje 3D skenery v rychlosti měření. Vzhledem k nízké časové náročnosti je vhodná například do sérové výroby. Laserová technologie je naopak velmi efektivním nástrojem v případě kusového měření, kdy je tato metoda nenáročná na čas přípravy a tím zaručuje velmi pohodlné získání kompletních 3D dat, se kterými může být nadále pracováno.

9 ZHODNOCENÍ

U výše uvedených výsledků měření je již na první pohled patrné, že zvolená technologie není zcela vhodná pro měření průměrů děr o daných tolerancích a součástky takové velikosti. Nicméně práce se všemi technologiemi nám ukazují jak jejich slabiny, tak i jejich přednosti.

Optický i laserový skener sice jsou schopné naskenovat i díru menších rozměrů do určité hloubky, ale vzhledem k velkému úhlu mezi objektem a skenerem, nemusí být data nasnímána s takovou přesností, aby odpovídala požadovaným tolerancím. Důležitou roli hraje i matnicí vrstva křídového spreje, která dokáže v mikronových tolerancích měřeného parametru výrazně změnit výsledek. Zvláštní případ jsou díry malých průměrů, kde není možné uhlídat homogenitu matnicího nástřiku a tím i jeho vrstvu.

U dotykového zařízení Hexagon byla limitní použitá sonda. Délka stopky sondy nevyhovovala měření díry D3, což se odrazilo na výsledku. Stopka byla v tomto případě příliš krátká na to, aby byla vhodně obodována nadefinovaná místa pro dotyk a vhodnější bohužel nebyla k dispozici. Dalším faktorem spojeným s celkovou nepřesností měření byla nezkušenost obsluhy přístroje. Měření proběhlo bez kompletního předchozího zaškolení, pouze s předchozím shlédnutím výukového videa tohoto přístroje a jeho návodem. Existuje mnoho možností pro zvolení počátku souřadnicového systému měřené součásti, tedy jeho zarovnání a také vícero variant pro definici měřených parametrů.

9.1 Návrh nejvhodnější technologie

Po zhodnocení výsledků všech tří zařízení hodnotím tyto technologie jako nedostatečné pro měření zadané součásti. Ovšem v dané situaci, kdy chyběla veškerá technická dokumentace si dovoluji navrhnout kombinaci mobilního laserového 3D skenování a dotykového měření.

Mobilní laserová technologie zaručuje přesnost i dostatečné rozlišení pro skenování tvarově složitých ploch. Zároveň je ale tato technologie velmi univerzální, protože pomocí ní je možné skenovat díly větších i menších rozměrů. Dále pak lze skenovat součásti bez výkresové dokumentace, díky čemuž je možné tuto dokumentaci v rámci reverzního inženýrství opět vytvořit.

Jako dotykovou technologii pro měření bych volil CMM s CNC posuvem. Tato technologie je nejen přesná, ale zároveň díky CNC posuvu eliminuje u dotyku vliv lidského faktoru.

9.2 Praktické návrhy a doporučení

Je nutné v tomto případě ale uvažovat nejen možnosti na trhu, ale i finanční možnosti firmy a celkovou situaci v portfoliu vyráběných dílů:

- V případě, že firma vyrábí tvarově složité produkty různých rozměrů s vyšší rozměrovou tolerancí, je možné využívat pouze samotnou metodu 3D skenování a případně si některé části, jakými jsou například díry menších průměrů, měřit běžnými měřidly (posuvka, mikrometr, apod.)

- Pro případ, kdy je nutné měřit díly menších rozměrů s nízkou rozměrovou tolerancí a větším množstvím děr, lze využít dotykovou technologii. U potřeby skenování dílů pro reverzní inženýrství je pak možná kombinace dotykové sondy a skenovacího nástavce na mechanickém či robotickém rameni.
- V situaci, kdy jsou skenovány nadrozměrné součásti, jakými mohou být několikatunové odlitky, svěřence nebo například části letadel, se nabízí jako vhodná měřicí metoda laserového mobilního 3D skeneru nebo například skenování s pomocí tzv. trackeru. Trackerem se rozumí kamerové snímače, které sledují určují polohu skeneru. K tomuto trackeru lze v některých případech připojit také přenosnou dotykovou sondu, která může sloužit právě pro měření děr.

10 ZÁVĚR

V úvodní části této práce je zhodnocen aktuální stav měřících technologií, možnosti jejich využití a požadavků z hlediska legislativy. Tato teoretická část je zaměřena především na optické a laserové technologie 3D skenování a jejich široké uplatnění. Tímto byly naplněny první dva cíle práce, a to zhodnocení současného stavu metodiky měření a dále popis dalších možností využití technologie 3D skenování ve výrobě.

Druhá část práce, tedy praktická, porovnává tři druhy měřících metod a zařízení. Jako měřící součást byl vybrán komponent z jižního kola, který následně ukázal přednosti i slabiny všech tří zařízení. Výsledky měření byly číselně i graficky vyhodnoceny a statisticky zpracovány. Statistické metody pro vyjádření nejistot měření nám ukázaly, že ani jedno ze tří zařízení není vhodné pro měření vybrané součástky. Z jiného pohledu lze ovšem konstatovat, že právě technologie 3D skenování byla tou ideální metodou pro reverzní inženýrství a konstrukci CAD modelu této součástky, protože výrobce neměl k dispozici technickou dokumentaci. Cíl práce pro návrh statistické metody pro vyhodnocení přesnosti a rychlosti porovnávaných zařízení byl díky spočítání nejistoty měření a času jednotlivých procesů měření v této části práce splněn.

V závěrečné části je celý proces měření podrobně popsán a jsou tu také uvedeny konkrétní praktické návrhy řešení a doporučení, čímž jsou splněny poslední z nastavených cílů.

Samotné 3D skenování je technologií velmi univerzální vzhledem k tomu, že jako výstup není pouze změřená hodnota, nýbrž kompletní 3D model, který může sloužit k dalším činnostem. Ve chvíli, kdy je nutné začít od úplného začátku a reálnou součást konstruovat od nuly, má 3D skener přidanou hodnotu především v tvarově složitých plochách, jejichž konstrukce zabírá neporovnatelné množství času.

V dnešní době jsou výrobní firmy vedeny k pořízení 3D technologie i požadavky zákazníků. Nezřídka je požadavek na rozměrovou kontrolu bezdotykovým 3D skenováním a výstupní protokol z tohoto procesu.

Pomalý proces ekonomické návratnosti investice do nových technologií, finanční situace podniku či nedostatečné zpracování všech naopak mohou být negativní vlivy, zapříčiňující v některých případech výběr nesprávné nebo kvalitativně nedostačující technologie, která dovoluje následné použití u zlomku celkového možností využití.

Důležitým poznatkem praktické části této práce je, že každá technologie měření nese svoje rizika nepřesnosti, která mohou být ovlivněna vícero faktory. Každý výrobek, technologie výroby a technologie měření tvoří neodmyslitelnou kombinaci, u které je nutné se všemi těmito faktory počítat. Právě tato práce dokazuje, že vhodná může být v některých případech i kombinace více druhů zařízení a není proto možné na jednom druhu výrobku celkově a objektivně hodnotit jeden konkrétní druh měřící technologie.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] 3D SCAN, 3D skenování [online]. 2018. [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/>
- [2] BENEŠ, Pavel. Porovnání způsobilosti systémů měření. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [3] BERALDIN, J.A. a M. GAIANI. Evaluating the Performance of Close Range 3D Active Vision Systems for Industrial Design Applications. In: SPIE: Electronic Imaging [online]. 2005 [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.90.2353>
- [4] BOURKE, Paul. PLY - Polygon File Format. [online]. [cit. 26.11.2016]. Dostupné z: <http://paulbourke.net/dataformats/ply/>
- [5] ČERMÁK, Jan. Metody 3D skenování objektů. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [6] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů (zákon o obecné bezpečnosti výrobků). In: . 2001, ročník 2001, číslo 102. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-102#p1>
- [7] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů. In: . 1997, ročník 1997, číslo 22. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-22>
- [8] ČSN EN ISO 9001. Systém managementu kvality: Požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 48 s. Třídící znak 010321.
- [9] ČSN EN ISO 14253-1. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Zkouška obrobků a měřidel měřením: Část 1: Pravidla rozhodování pro prokázání shody nebo neshody se specifikacemi. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 36 s. Třídící znak 014100.
- [10] DOKOUPIL, F. Stanovení odchylek měření 3D optického skeneru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek, Ph.D..
- [11] Fotogrammetrie – Základní pojmy, rozdělení, metody a využití, Geodézie – přednáška 10. Mendelova univerzita v Brně, [online], [cit. 4-2-18] Dostupné z: <http://uhulag.mendelu.cz/>
- [12] GOTHİ, S.S. a P. RASTOGI. Fringe Projection Techniques: Whither we are?. Optics and lasers in engineering [online]. 2010, roč. 48, č. 2, s. 133-140 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <http://infoscience.epfl.ch/record/140745/files/OLEN.pdf>
- [13] HENNEMANN, Martin. Ensensio Training - Product Overview. 42 s. [cit. 2020-06-25]. IDS.
- [14] HENNEMANN, Martin. Ensensio Training – Stereo Vision Theory & Implementation. 30 s. [cit. 2020-06-25]. IDS.
- [15] JANÁKOVÁ, Ilona. Optické 3D měření, přednáška z předmětu Počítačové vidění. VUT v Brně. [online], [cit. 28-1-18]. Dostupné z: <http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/>

- [16] JANKOVÝCH, Róbert. 000-Statistické nástroje v metrologii - přednáška. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [17] JANKOVÝCH, Róbert. Zkušebnictví (FSI-XZK) - přednáška: 1. Státní zkušebnictví - Technické požadavky na výrobky. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [18] KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV Statistika a pravděpodobnost. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.
- [19] MM, Digitalizace - její princip a rozdělení [online]. 2018. [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
- [20] MOONS, T. 3D Reconstruction from Multiple Images Part 1: Principles. Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision [online]. 2008, 4(4), 287-404 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1561/06000000007. ISSN 1572-2740. Dostupné z: <http://www.nowpublishers.com/article/Details/CGV-007on> area scanning. iCS: 17.040.01, August 2002.
- [21] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. Strojírenská metrologie. Ostrava, 2011. Studijní opora. Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
- [22] SHENGYONG, C., et al. Active sensor planning for multiview vision tasks. Berlin: Springer, 2008. ISBN 9783540770718. Dostupné z: http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783540770718-c2.pdf?SGWID=0-0-45-494886-p173786413
- [23] ŠNAJDÁREK, Ladislav. Bakalářská práce - Metody 3D laserového skenování obrobků ve výrobním procesu. Brno : autor neznámý, 2008.
- [24] ŠRÁMEK, Jan. Nejistoty měření v praxi - souhrn. Brno, 2013. Studijní opora. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [25] ŠTRONER, Martin. Laserové skenování - přednáška: Teorie fungování terestrických skenovacích systémů. Fyzikální principy skenovacích systémů. Bezpečnost práce. Praha, 2009. Studijní opora. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [26] ŠTRONER, Martin a Pospíšil, Jiří. Terestrické skenovací systémy. Vydání první. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04141-3.
- [27] ÚŘEDNÍ VĚSTNÍK EVROPSKÉ UNIE: Informace a oznámení. In: . 2016, C 272. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=OJ:C:2016:272:TOC>
- [28] VDI/VDE 2634 - Part 2 Optical 3-D measuring systems - Optical systems based
- [29] VOISIN, S., D.L. PAGE a S. FOUFOU. Color Influence on Accuracy of 3D Scanners Based on Structured Light. In: Machine Vision Applications in Industrial Inspection XIV [online]. 2006, roč. 6070 [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: <http://imaging.utk.edu/publications/papers/2006/EI-6070-9-sv.pdf>

11.1 Seznam zdrojů grafů, obrázků a tabulek

- [30] 3D scan [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/skenery/prenosne-3d-skenery/handyscan-3d-black/>
- [31] 3D scanning solutions [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.3dscanning-solutions.co.uk/product/atlascan-3d-laser-scanner/>
- [32] 3D skenery. Skenování ve 3D [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.skenovani3d.cz/3d-skenery/rv-pro/>
- [33] Calibration etalon by GOM for so called Acceptance Test. Research gate [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Calibration-etalon-by-GOM-for-so-called-Acceptance-Test_fig1_323614997
- [34] Geomagic Design X reverse engineering with GOM - Capture 3D - Impeller RE [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=xgfCu8NgM3A>
- [35] Global 3D scanning market size from 2013 to 2020. Statista [online]. 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/883131/global-3d-scanning-market-size/#statisticContainer>
- [36] Hexagon absolute Arm: Product brochure. 2019, 28.
- [37] Hexagon absolute Arm: Product brochure. 2019, str.16, 28.
- [38] HRBKOVÁ, Eliška. Problematika měření obecných tvarových ploch s využitím CMM. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [39] Kverulant.org: Obecně prospěšná organizace [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.kverulant.org/kauza/ce-aneb-china-export>
- [40] Made-in-China [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://zg-tech.en.made-in-china.com/product/CBoQKfSAXqpY/China-Professional-Handheld-Industrial-Metrology-Grade-3D-Scanner.html>
- [41] RangeVision PRO. RangeVision [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.rangevision.eu/rangevision-pro/>
- [42] Rozměrová kontrola. Skenování ve 3D [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.skenovani3d.cz/sluzby/rozmerova-kontrola/>
- [43] URBAN, R. 3D skenovací systém s využitím virtuálních binárních značek : studie disertační práce. Praha : ČVUT, Fakulta stavební, 2010. 20 l. Školitel Martin Štroner.
- [44] Visionmar [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://visionmar.cz/katalog-produktu/3d-kamery/>

12 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

12.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení technologie 3D skenování	17
Obrázek 2: Princip metody strukturovaného světla	18
Obrázek 3: Metoda laserové triangulace.....	19
Obrázek 4: Stacionární optický 3D skener	20
Obrázek 5: Mobilní laserový 3D skener	21
Obrázek 6: Dotykové měřicí rameno	22
Obrázek 7: Polygonová síť - detail	25
Obrázek 8: Detekce ploch pro reverzní inženýrství.....	26
Obrázek 9: Rozměrové porovnání CAD modelu a 3D skenu.....	27
Obrázek 10: Rozdíl mezi označením CE a China Export.....	29
Obrázek 11: Artefakty pro testování dle VDI/VDE 2634	30
Obrázek 12: Gaussovo rozdělení	32
Obrázek 13: Optický 3D skener RangeVision PRO	35
Obrázek 14: Kalibrační proces v softwaru.....	37
Obrázek 15: 3D skener ZG AtlaScan.....	38
Obrázek 16: Mechanické dotykové rameno Hexagon Absolute Arm 8312-6.....	40
Obrázek 17: Součástka z celoodpruženého jízdního kola.....	42
Obrázek 18: CAD model se základními rozměry pro měření.....	42
Obrázek 19: Podmínky pro 3D skenování se skenerem RangeVision PRO.....	43
Obrázek 20: Náhled procesu 3D skenování v softwaru RangeVision ScanCenter	44
Obrázek 21: Proces zpracování dat v softwaru RangeVision ScanCenter	45
Obrázek 22: Vyhodnocení výsledků v softwaru GOM inspect	45
Obrázek 23: Podmínky pro skenování s laserovým 3D skenerem	46
Obrázek 24: Proces 3D skenování laserovým 3D skenerem	47
Obrázek 25: Výsledný sken 3D skeneru ZG AtlaScan.....	47
Obrázek 26: Měření s dotykovým měřicím ramenem Hexagon.....	48
Obrázek 27: Dotyková sonda.....	49
Obrázek 28: Pole shody pro rozteč děr L1 (RangeVision PRO)	57
Obrázek 29: Pole shody pro rozteč děr L1 (ZG AtlaScan).....	58
Obrázek 30: Pole shody pro rozteč děr L1 (Hexagon Absolute Arm).....	58
Obrázek 31: Pole shody pro rozteč děr L2 (RangeVision)	58
Obrázek 32: Pole shody pro rozteč děr L2 (ZG AtlaScan).....	59

12.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Skenovací zóny	35
Tabulka 2: Naměřené hodnoty pomocí RangeVision PRO	50
Tabulka 3: Naměřené hodnoty pomocí ZG AtlaScan.....	50
Tabulka 4: Naměřené hodnoty pomocí Hexagon Absolute Arm.....	50
Tabulka 5: Aritmetický průměr	53
Tabulka 6: Výběrová směrodatná odchylka	54
Tabulka 7: Standardní nejistota typu A	54

Tabulka 8: Standardní nejistota typu B	55
Tabulka 9: Standardní kombinovaná nejistota	55
Tabulka 10: Standardní celková rozšířená nejistota	56
Tabulka 11: Konečné výsledky naměřených hodnot pro RangeVision	56
Tabulka 12: Konečné výsledky naměřených hodnot pro ZG AtlaScan	57
Tabulka 13: Konečné výsledky naměřených hodnot pro Hexagon Absolute Arm	57
Tabulka 14: Časy počáteční přípravy	59
Tabulka 15: Časy měření pro RangeVision PRO	60
Tabulka 16: Časy měření pro ZG AtlaScan.....	60
Tabulka 17: Časy měření pro Hexagon Absolute Arm	60

12.3 Seznam grafů

Graf 1: Globální vývoj trhu u 3D skenerů	24
Graf 2: Gaussovo rozdělení	32
Graf 3: Intervaly pravděpodobnosti.....	33
Graf 4: Porovnávací graf hodnoty D1	51
Graf 5: Porovnávací graf hodnoty D2	51
Graf 6: Porovnávací graf hodnoty D3	52
Graf 7: Porovnávací graf hodnoty L1	52
Graf 8: Porovnávací graf hodnoty L2.....	53
Graf 9: Rozšířená nejistota	56
Graf 10: Časy počáteční přípravy.....	59
Graf 11: Průměrný čas na jedno měření	60